INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL PLACER DE LAS MATEMATICAS

RIEGO CON AGUA DEL MAR

EL BASURERO ESPACIAL

DOLORES DE ESPALDA



OCTUBRE 1998
800 PTAS.

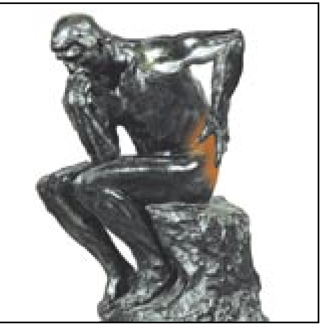


Octubre de 1998 Número 265



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Cortesía de Bridgeman Art Library; manipulación digital Jana Brenning

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Randy Montoya, *Laboratorio Nacional Sandia*
8	Michael Goodman (*arriba*), Laboratorio Nac. Sandia (*abajo*)
9-11	Michael Goodman
14-19	Esperanza Martínez Romero, Rafael Palacios y Jaime Mora
20-21	Tomo Narashima
22-23	Slim Films (*arriba*), Tomo Narashima (*abajo*)
24-27	Tomo Narashima
44-45	Slim Films (*izquierda*), Itt Kaman Sciences Corporation (*derecha*)
46-47	Laurie Grace
48	NASA; Laurie Grace
50	Donna Bise, *Gamma Liaison*
51-57	Ian Worpole
58-59	Richard Jones
60-61	Universidad de Arizona (*arriba izquierda*), Dan Murphy (*arriba centro y derecha*) y Slim Films (*abajo*)
62-63	Richard Jones (*izquierda*), Slim Films (*derecha*)
64-65	John W. Karapelou
66	Chel Dong
67	Chel Dong (*arriba*); cortesía de Richard A. Deyo, fuente: Jeffrey Jarvik
68	Dusan Petricic
71	David Scharf
72-73	Richard Jones (*micrografías*), Laurie Grace (*abajo*)
74-75	Richard Jones (*micrografías*), Kevin Ellsworth (*abajo*)
76-77	Harry Rogers *Photo Researchers, Inc.*; Corbis-Bettmann
78	Charles Willson Peale *Independence National Historical Park* (*izquierda*), Bridgeman Art Library (*derecha*)
79	Library Company of Philadelphia (*arriba izquierda*), Raphaelle Peale, *Delaware Art Museum* (*arriba derecha*) y College of Physicians of Philadelphia (*abajo*)
80	Library Company of Philadelphia
81	Samuel Sartain, sobre un cuadro de John Neagle, *Culver Pictures*; Slim Films (*gráfica*)
84-85	Rick Jones
86	Matt Collins
87	Johnny Johnson
88	Dusan Petricic
96	Karl Gude; Bryan Christie (*esquemas*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *La fusión y la pinza Z*; Luis Bou: *Computación con ADN, Un cuarto de siglo de matemáticas recreativas* y *Juegos matemáticos*; Mónica Murphy: *Seguimiento y control de la chatarra espacial*; Victoria Laporta: *Riego con agua del mar*; José M.ª Valderas Martínez: *Dolor lumbar* y *Nexos*; M.ª José Báguena: *La epidemia de fiebre amarilla de Filadelfia de 1793*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

Ciencia y sociedad:

Julio Samsó y Ana M.ª Rubio

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell; Alden M. Hayashi; Madhusree Mukerjee; George Musser; Sasha Nemecek; David A. Schneider y Glenn Zorpette; Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.150	20.700

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 91 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

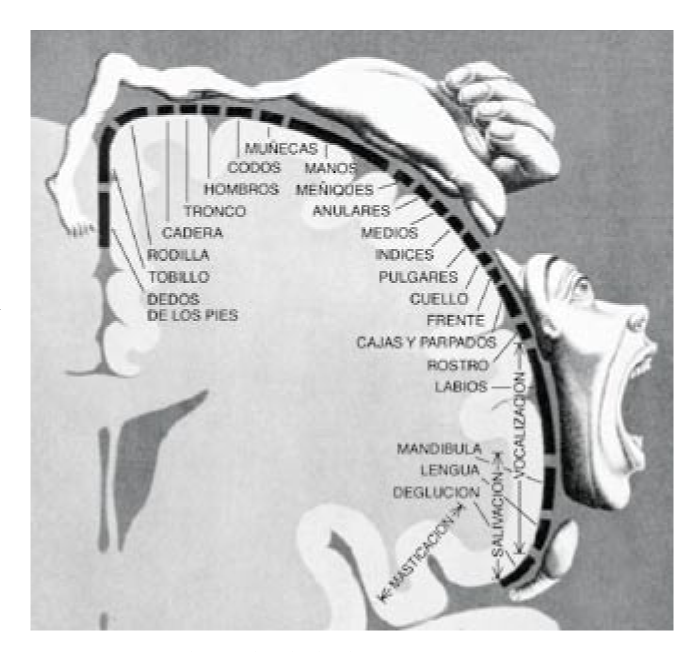
HACE...

...cincuenta años

PÁNICO ROJO. «Durante el pasado año, el gobierno federal se ha encontrado con unos científicos y un personal técnico cada vez menos dispuestos a aceptar trabajar para el estado o continuar en un empleo público. En ese contexto, una quincena de los 150 prominentes expertos en investigación atómica que prestaron sus servicios en la guerra han abandonado su puesto oficial desde el fin del conflicto. Se debe esta situación (en palabras del presidente Truman) a 'los ataques contra los científicos aparentemente en nombre de la seguridad'. El presidente denunció 'la creación de un ambiente en el que nadie se siente a salvo frente al aireo público de rumores infundados, chismorreos y difamación' como 'la más antiamericana de las manías contra la que hoy hemos de luchar'.» [*Nota de la Redacción: El mismo Truman fue parcialmente responsable de ese ambiente al ordenar investigar la lealtad de todos los empleados del gobierno en marzo de 1947.*]

PSICOCIRUGÍA. «Basándose en los trabajos iniciales efectuados en Portugal por Egaz Moniz y Almeida Lima, en Norteamérica se les ha practicado a 2000 personas la leucotomía [ahora llamada lobotomía] o técnicas afines. Ese corte de las fibras que conectan la región prefrontal con el centro talámico del tallo cerebral parece ser que libera al 'nuevo' cerebro de la región prefrontal del predominio emocional que le ejercía el 'viejo' cerebro del tallo cerebral. Cualquiera que sea el mecanismo involucrado, la transformación de dementes violentos en personas normales ha sido asombrosa. Sin embargo, pueden asimismo darse cambios adversos, que deterioren la personalidad.»

HOMÚNCULO MOTRIZ. «Nuestra ilustración muestra una representación esquemática de la zona motriz del cerebro, proyectada sobre la sección transversal de un hemisferio. Cada una de las zonas señaladas en tan grotesco maniquí está dedicada a enviar impulsos a la correspondiente parte del cuerpo. Las distintas partes del homúnculo están reducidas o ampliadas proporcionalmente a la cuantía en que se usa la parte del cuerpo relacionada. Los dibujos proceden de la monografía 'The Cerebral Cortex of Man', del doctor Wilfred Penfield.»



Control cerebral de las funciones motrices

...cien años

QUÍMICA ETÉREA. «El señor Charles F. Brush leyó un importante comunicado ante la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia, donde describía la extracción de la atmósfera de un gas más ligero que el hidrógeno. A la nueva sustancia se le ha puesto el nombre de 'eterión'. Afirma el señor Brush que la capacidad del eterión para conducir calor es cien veces superior a la del hidrógeno. Considera, asimismo, que el gas se extiende indefinidamente llenando todo el espacio.»

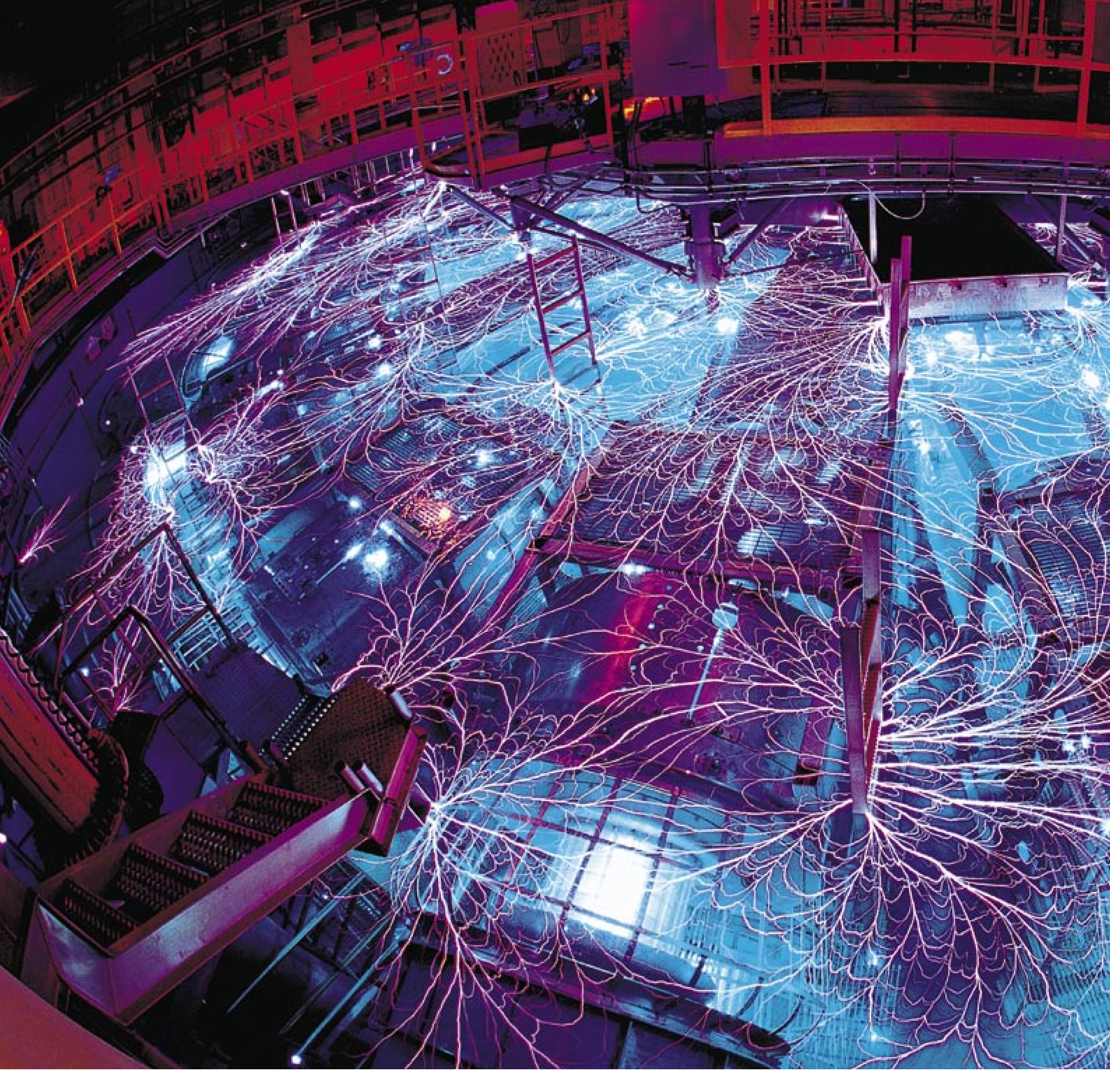
GLOBO DIRIGIBLE. «Monsieur De Santos Dumont, afamado deportista parisiense, efectuó un muy interesante experimento con un aerostato. Se trata de un cilindro conificado en ambos extremos, de 25 metros de longitud, hecho de seda japonesa ultraligera impermeabilizada. Globo, barquilla, motores y timón suman unos 52 kilogramos de peso. El motor es de la clase que se encuentra habitualmente en los triciclos automóviles, dotado de dos cilindros superpuestos. Se dice que es la primera vez que se emplea un motor de esta clase en un aerostato. El aeronauta siguió un rumbo hacia el Bois de Boulogne a una altura de casi 200 metros antes de que el ingenio comenzara a perder rigidez y se viera obligado a aterrizar.»

...ciento cincuenta años

BARÓMETRO MODERNO. «Recientemente se ha exhibido en Londres un nuevo barómetro que no usa alcohol ni mercurio y del que se dice que es un indicador de los cambios atmosféricos sencillo, bello y preciso, basado en un principio nuevo [aprovecha la acción de la presión del aire sobre un diafragma que tapa una cámara evacuada]. Su inventor, un caballero francés, lo llama Barómetro Aneroide.»

NAUFRAGIOS EN FLORIDA. «En los arrecifes y cayos de Florida se pierden, en naufragios, del orden de un millón de dólares anuales por término medio. Tiene la culpa la falta de una cartografía precisa de esas costas. Aunque Florida pertenece a Estados Unidos desde hace veintisiete años, no se ha levantado una cartografía original americana de costas tan peligrosas. Los navegantes tienen que depender de antiguas cartas marinas españolas y las que hicieron los británicos entre 1763 y 1784.»

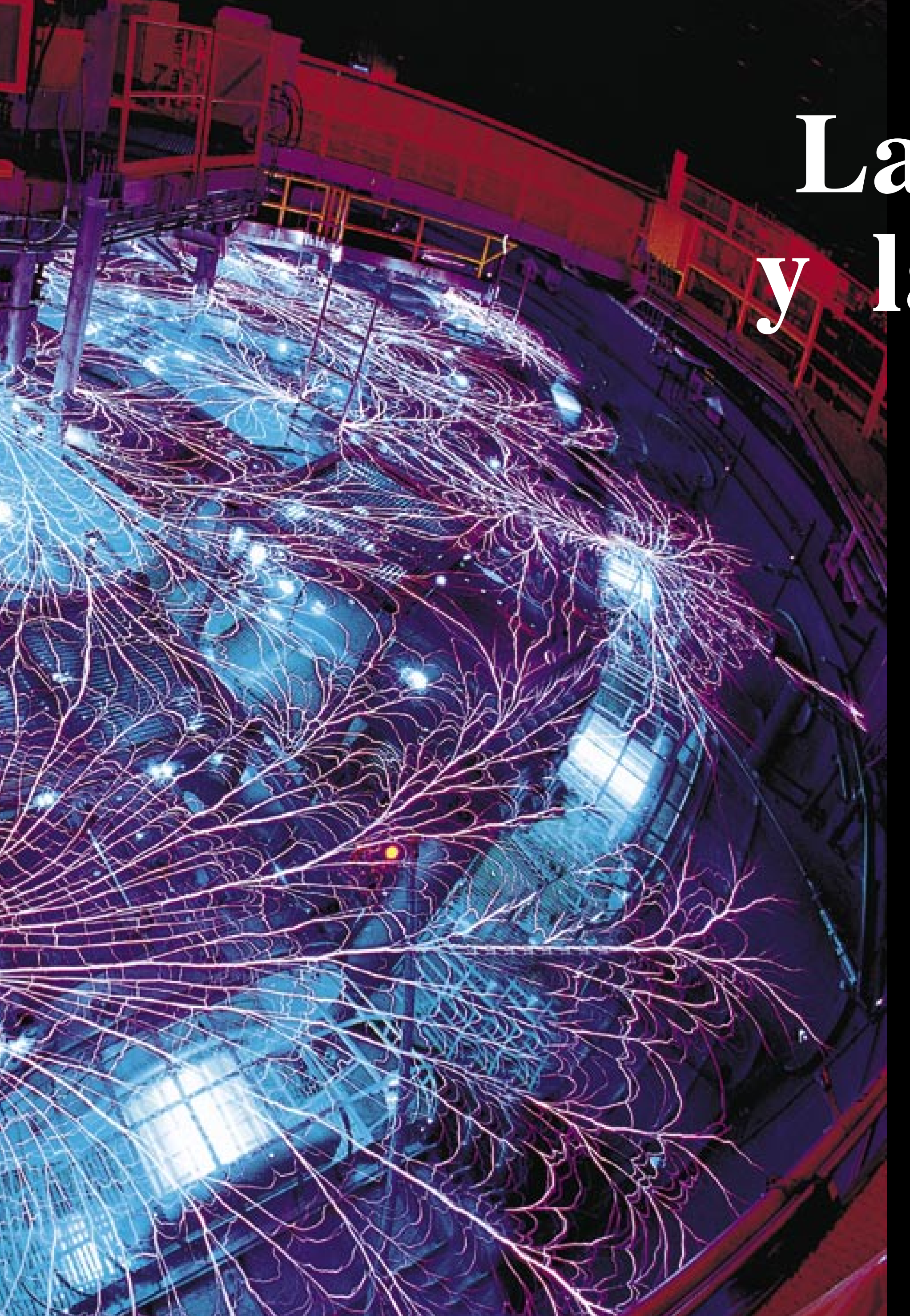
PARA USOS MEDICINALES. «El doctor Rennes, de Bergerac, aconseja introducir las sanguijuelas en agua con un poco de vino, lo mejor para que estén algo calientes, inmediatamente antes de utilizarlas; se aplican con tal pasión, que incluso las más perezosas perforan la piel al instante; las que se han dejado estar un poco antes de emplearlas se adhieren.»



1. EL ENCENDIDO de una máquina Z provoca un maravilloso espectáculo. Las líneas primarias de transmisión están sumergidas en agua, para su aislamiento. Un porcentaje muy pequeño de la energía empleada en el encendido del dispositivo escapa a la superficie del agua en forma de grandes descargas eléctricas. Como pasa en los relámpagos, los altos voltajes desgarran la interfaz aire-agua y crean las descargas visuales. El fenómeno dura microsegundos. Una cámara automática, con el diafragma abierto, registra la filigrana de líneas brillantes creada por las rápidas descargas.

Hay cosas que no cambian nunca. ¿O sí? Remontémonos a 1979. Hacía casi 30 años que se venía investigando la fusión. La ignición sólo se había conseguido en la bomba de hidrógeno. Escribí yo por entonces un artículo en *Investigación y Ciencia* donde afirmaba que, antes de 10 años, se demostraría en el laboratorio la viabilidad de la fusión nuclear y que, una vez llegados a ese punto, podríamos levantar centrales de energía de fusión [*véase* "Energía de fusión con haces de partículas", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1979]. Nos inducía a ello entonces, y nos induce ahora, el conocimiento de que bastaba un dedal de hidrógeno pesado líquido para producir la energía de 20 toneladas de carbón.

Los investigadores llevan casi 50 años en busca del tesoro escondido de la fusión. Para la ignición, siguen diciendo, faltan todavía "10 años". La crisis de la energía de los años setenta se perdió en el olvido y se va agotando la paciencia de quienes subvencionan nuestro



La fusión y la pinza Z

Gracias a la máquina Z contamos ahora con una nueva forma de desencadenar, mediante destellos de rayos X que duran nanosegundos, la fusión controlada

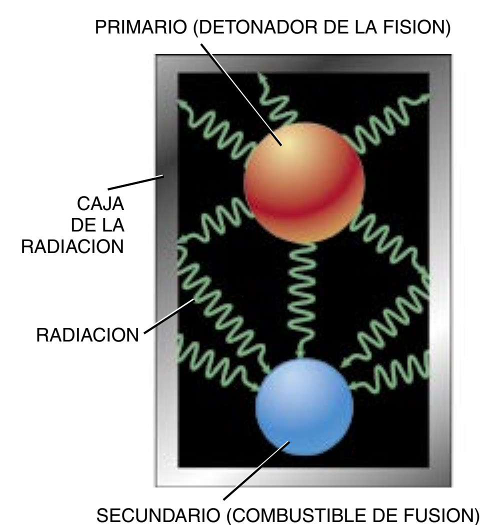
Gerold Yonas

estudio. No hará tres años cuando sentí fuertes tentaciones de tirar la toalla en nuestras instalaciones de los Laboratorios Nacionales Sandia: teníamos todavía que multiplicar por 50 la energía obtenida para conseguir la requerida en el encendido de la fusión.

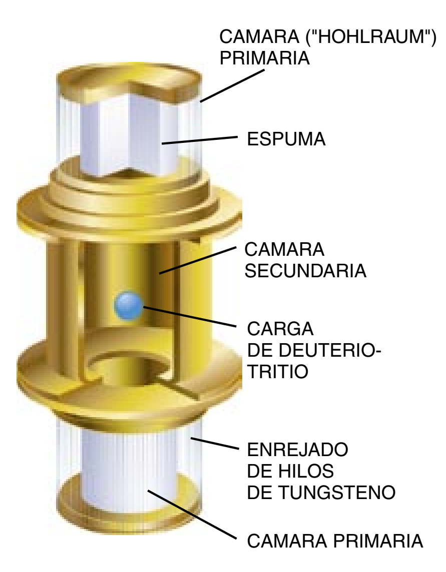
Sin embargo, vuelvo a pensar que, de aquí a 10 años, se logrará. ¿El motivo? Los potentes impulsos de rayos X que hemos generado con un nuevo tipo de aparato, la máquina Z, que me han devuelto la fe.

En la bomba de hidrógeno tenemos la prueba de la posibilidad real de la producción artificial de la fusión. El detonante es en ella la explosión de fisión atómica, que calienta y comprime la vasija del combustible y provoca con ello la ignición y la combustión nuclear del hidrógeno encerrado. Parece cosa sencilla. Pero provocar la ignición de una reacción de fusión significa forzar que los núcleos de dos isótopos de hidrógeno —deuterio y tritio— se fundan en núcleos de helio, lo que desprende una energía enorme. La compresión debe hacerse con una simetría casi perfecta, para que el hidrógeno se aplaste uniformemente hasta hacerse muy denso.

En los primeros decenios de la investigación sobre control de la fusión, parecía remota la perspectiva de crear una versión de la bomba H a escala de laboratorio. Por eso se adoptó el principio del confinamiento magnético. En razón del mismo, un vigoroso campo magnético atrapa un plasma caliente de deuterio-tritio du-







2. LA FUSION por confinamiento inercial se basa en los principios de la bomba de hidrógeno (*izquierda*). En ella la radiación de una bomba de fisión (el "primario") comprime y calienta el combustible de fusión, contenido en el secundario. La minúscula versión de laboratorio (*derecha*) tiene que bañar de radiación la carga de combustible, del tamaño de un grano de pimienta, y concentrar su potencia en el combustible, de manera que sufra una implosión uniforme.

rante el tiempo suficiente para que empiece la fusión. Así se logró, en 1991, la fusión de deuterio y tritio, primero en el Toro Europeo Conjunto y luego en el Reactor de Fusión de Prueba Tokamak de la Universidad de Princeton. La próxima etapa a cubrir será en el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER), proyecto compartido por Estados Unidos, Europa, Japón y Rusia. Mas, por culpa de las dificultades económicas y técnicas, amén del desacuerdo sobre el lugar de emplazamiento, las cosas se están retrasando ya en la fase de diseño.

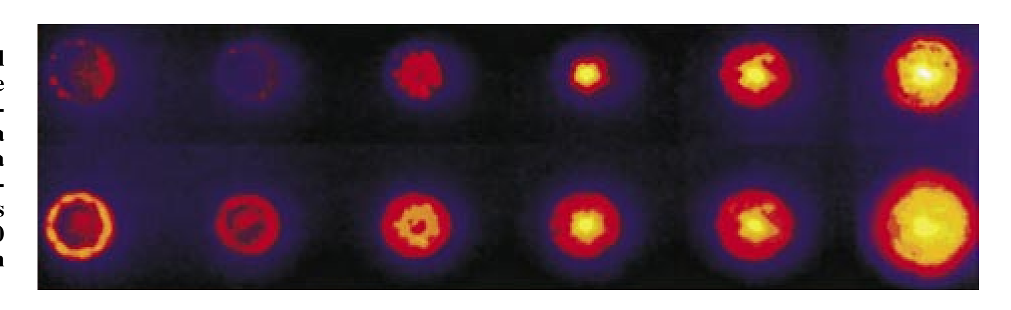
A principios de los años setenta, investigadores de tres laboratorios nacionales, a saber, Los Alamos, Lawrence en Livermore y Sandia, consideraron otra forma de abordar la fusión. En el confinamiento inercial, del que es un ejemplo la bomba H, se usa la radiación para comprimir la carga de combustible de hidrógeno. Aunque, si bien la bomba H descansa en la radiación emitida por una bomba atómica, en los primeros intentos de laboratorio se emplearon láseres intensos o haces de electrones para provocar la implosión de la carga de combustible.

Para llegar a la ignición se requiere, lo sabemos ahora, una potencia mucho mayor de lo que se pensaba. Hacia 1979, la necesaria se estimaba ya en un millón de joules aplicados en 10 nanosegundos sobre el exterior de una carga de combustible del tamaño de un grano de pimienta, es decir, 100 terawatts de potencia; cifra ésta que equivale al consumo de electricidad de media docena de casas en varias horas pero en una fracción de segundo. Para satisfacer esa demanda, desde nuestro laboratorio de Sandia y desde la Unión Soviética se empezó a trabajar con una técnica novedosa, la de pulsos de potencia, también llamada potencia pulsante.

En un sistema de potencia pulsante, la energía eléctrica se almacena en condensadores y se descarga mediante pulsos breves, que se acortan todavía más para realzar la potencia de cada pulso y se comprimen en el espacio para aumentar la densidad de energía. Estos destellos de energía electromagnética se convierten en intensos pulsos de partículas cargadas o se los utiliza para mover otros dispositivos. Los sistemas de fusión por láser, por contra, arrancan con pulsos eléctricos mucho más largos, que se amplifican y configuran dentro del propio sistema láser. La potencia pulsante parecía una opción alternativa a los láseres por su probada eficacia y bajo coste.

Se inició esta técnica en 1964, en el marco de la Autoridad de la Energía Atómica del Reino Unido. A mediados del decenio, la Unión Soviética, el Reino Unido y Estados Unidos (con el apoyo de los departamentos de energía y defensa) mejoraron sus prestaciones. Pero el rendimiento energético alcanzado se quedaba muy corto, y se la descartó en la carrera hacia la fusión. Se la reservó para simular en el laboratorio los efectos de la radiación en los componentes de las armas.

En Sandia, bajo mi dirección, en otros laboratorios nacionales y en el Instituto Kurchatov de la Unión Soviética, bajo la de Leonid Rudakov, se acometieron en 1973 programas de fusión por confinamiento inercial subvencionados. Desde entonces hemos avanzado muchísimo en la técnica para crear potencia de ignición y las exigencias del propio proceso de ignición, sea con láseres o con potencia de pulsos. Decenios de experimentos, cuidadosamente ejecutados, con láseres poderosos han mejorado y confirmado los programas de ordenador que diseñan las cargas de combustible. Esas simulaciones nos revelan que, para la ignición del combustible, se requieren unos



3. LOS RAYOS X se generan cuando el plasma originado por los filamentos de tungsteno cae sobre un tubillo de carbono-deuterio colocado en el eje de una pinza Z. La secuencia va de izquierda a derecha, a intervalos de tres nanosegundos. La serie superior muestra los rayos X cuya energía es de más de 800 electronvolts; la inferior, los que tienen alrededor de 200 electronvolts.

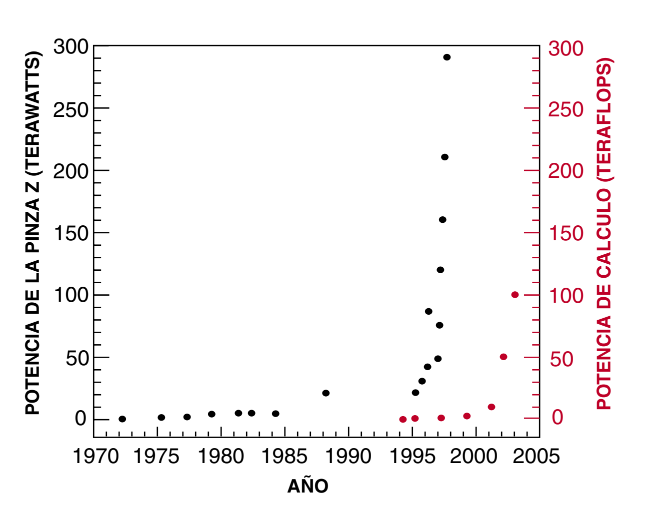
500 terawatts y dos millones de joules de radiación a tres millones de grados centígrados durante cuatro nanosegundos.

Los láseres pueden hacerlo. Tras 13 años de investigaciones con el láser Nova de 30 kilojoules, el laboratorio Lawrence está construyendo en Livermore un láser mucho más poderoso, que será la pieza central de la Instalación Nacional de Ignición. Si tiene éxito, sacará de la fusión tanta energía, al menos, como la que el láser aplique a la carga. Con todo, no se acercará todavía a la producción de la energía requerida para alimentar el láser, unas 100 veces más. Para alcanzar esa meta hay que llegar al régimen de "alto rendimiento", es decir, a una generación de energía de fusión mucho mayor que la gastada por el láser. La Instalación dará el paso siguiente hacia el alto rendimiento, pero la técnica actual de los láseres es demasiado cara para avanzar más.

Llevábamos 25 años de esfuerzo y nos encontrábamos lejos de conseguir la fusión por potencia pulsante. Cabe imaginar el estado de ánimo en Sandia, hace menos de un lustro; no resultó, pues, fácil decidir continuar con el programa. Pero nuestra perseverancia acabó recompensada. La producción de potencia ha aumentado enormemente; si a mediados de los sesenta la potencia pulsante producía una milésima de terawatt de radiación, hemos llegado ya a los 290 terawatts en los experimentos con la máquina Z. Confiamos en obtener una fusión de alto rendimiento con unos impulsos de radiación de 1000 terawatts.

No menos importante ha sido el progreso registrado en la concentración de la energía en una minúscula pella de combustible. Empezamos con los haces de electrones en los años setenta; en los ochenta nos pasamos a los de iones, que debían calentar un blanco hasta una temperatura muy alta. Pero cuesta guiar las partículas cargadas y concentrarlas en haces muy estrechos. Los rayos X ofrecen, en principio, un atractivo

GEROLD YONAS es vicepresidente de sistemas, ciencia y tecnología de los Laboratorios Nacionales Sandia. Ha ganado merecida fama en el campo de los haces intensos de partículas, fusión por confinamiento inercial y técnicas para la defensa estratégica.



4. LA POTENCIA obtenida con pinzas Z de enrejados filamentosos procedió en su avance con suma lentitud de 1970 a 1995. El ritmo espectacular de los dos últimos años resultó del progreso que nos ha llevado hasta unos complejos dispositivos de hilos múltiples, aceleradores de corriente y modelos informáticos de los plasmas. Los puntos rojos y la escala muestran la creciente potencia de cálculo disponible para hacer simulaciones.

mejor: pueden llenar uniformemente el espacio en torno a una vasija de combustible. Contamos ahora con la posibilidad de poner en marcha la fusión por medio de sistemas de potencia pulsante que crean destellos intensos de rayos X en una pequeña cámara de reacción. Debemos ese avance a la "pinza Z", una estrategia que se remonta a los comienzos de las investigaciones de la fusión por confinamiento magnético en los años cincuenta.

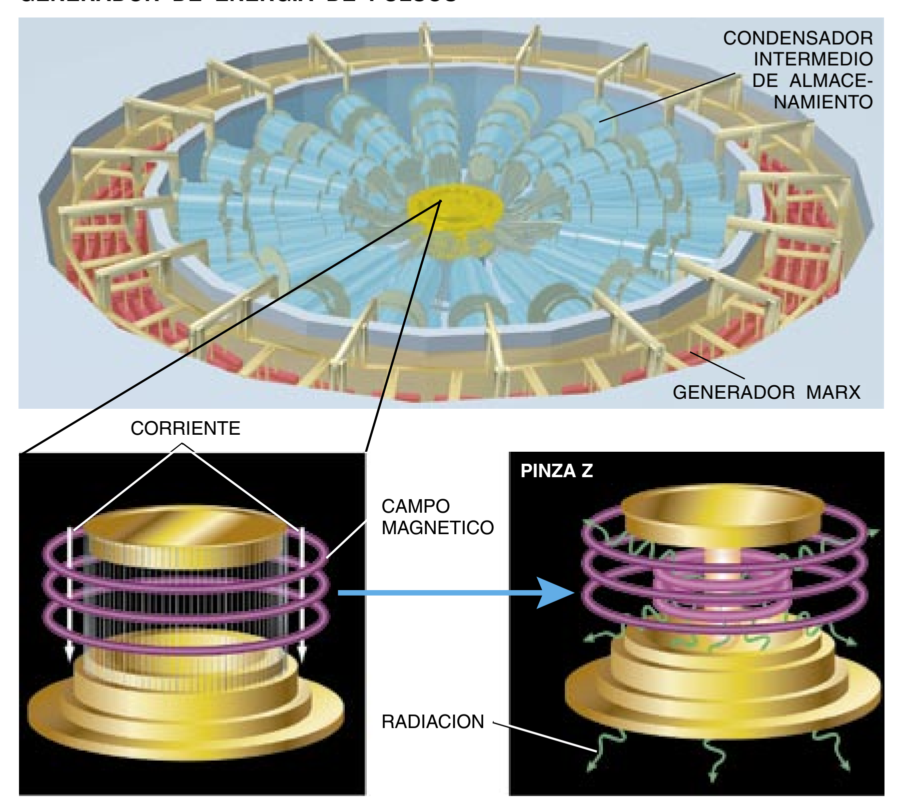
En su inicio, con la pinza Z se quería poner en marcha la fusión haciendo pasar corriente eléctrica a través de gas de deuterio. La corriente ioniza el gas y a la vez genera un campo magnético que "pinza" el plasma resultante hasta una temperatura y una densidad altas a lo largo de la trayectoria de la corriente, o eje *z*, como se conviene en llamarla. Pero se vio que esta técnica no podía comprimir un plasma uniformemente: las inestabilidades del fluido rompen el plasma en grumos; por eso no vale la pinza Z para la fusión. Pero la compresión del plasma genera además rayos X, con energías de hasta 1000 electronvolts. Durante 30 años, la investigación sobre las pinzas Z en Estados Unidos, el Reino Unido y la Unión Soviética se centró en optimizar esa producción de rayos X de menos de un kiloelectronvolt, que se usaban para poner a prueba la reacción de materiales y dispositivos electrónicos ante la radiación emitida por armas nucleares.

La pinza Z ha ganado ahora nueva vida, esta vez como medio para iniciar la fusión inercial. En los tres últimos años hemos mostrado que, gracias a la combinación de la eficacia y bajo coste de la potencia rápidamente pulsante con la sencillez y eficacia de la pinza Z como fuente de radiación, deberíamos llegar a la ignición utilizando los rayos X de menos de un kiloelectronvolt para comprimir una carga de combustible de fusión. Además, el coste asequible de una fuente de potencia pulsante de rayos X debería permitirnos ir más allá, hasta la combustión eficaz de la carga y el pleno rendimiento.

Para desencadenar la fusión, la pinza Z ha de estar encerrada en una cámara de radiación (*hohlraum*, palabra que en alemán significa "cavidad") que atrape los rayos X. En el sistema investigado por mi equipo, se colocaría la pinza Z en una cámara primaria, con el combustible alojado en una cámara secundaria, menor. En otro método la pella de combustible estaría en una espuma plástica de baja densidad, en el centro de la pinza en implosión y dentro de la cámara primaria. El secreto estriba en que los rayos X generados mientras la pinza se aplasta contra sí misma, bien sobre el eje *z*, bien sobre la espuma, queden contenidos en la cámara; allí dentro bañarán la carga de combustible de un modo uniforme, a la manera en que la caja de la bomba H atrapa la radiación emitida por el disparador atómico. Los experimentos realizados a lo largo de los tres últimos años muestran que ambos métodos deberían funcionar, pues podemos crear una pinza Z que se mantenga uniforme y entera durante el suficiente tiempo para que realice su trabajo.

¿En qué han cambiado las cosas con respecto al largo período anterior de progreso lento? A imagen de Thomas Edison, que probó mil materiales antes de dar con el secreto de la bombilla, descubrimos nosotros que se podía reducir la inestabilidad de la pinza Z si extraíamos

GENERADOR DE ENERGIA DE PULSOS



5. LA CONCENTRACION secuencial de energía en una instalación de potencia pulsante empieza en una serie circular de 36 generadores Marx, donde se carga en dos minutos con 90.000 volts un banco de condensadores de 5000 metros cúbicos. Los impulsos eléctricos de los 36 módulos pasan a una sección, aislada con agua, de condensadores de almacenamiento intermedios, donde se los comprime a una duración de 100 nanosegundos. Tras atravesar un conmutador de gas activado por láser que sincroniza los 36 impulsos al nanosegundo, el impulso combinado viaja al montaje de hilos (*a la izquierda del todo*) por cuatro líneas de transmisión magnéticamente aisladas que minimizan la pérdida de energía. La pinza Z (*izquierda*) se forma cuando miles de ampères de corriente eléctrica pasan por los hilos, cuyo diámetro es un décimo del de un cabello.

deprisa la energía, en la forma de un destello breve de rayos X, antes de que las inestabilidades destruyeran la geometría. Y en efecto, se retira la energía de la pinza antes de que acabe transformándose en movimientos de plasma rápidos y a pequeña escala.

La inestabilidad que aqueja a la pinza es la misma que hace que una capa de vinagre vertida cuidadosamente sobre aceite, menos denso, caiga sin regularidad en el fondo del tarro. Esa inestabilidad es buena para las ensaladas cuando se agita el tarro, mas para la consecución de la fusión es un inconveniente. Pero conocíamos las simulaciones de ordenador de Darrell Peterson, de Los Alamos, y Melissa R. Douglas, de Sandia, en cuya virtud cuanto más uniforme fuera el plasma inicial, más uniforme y regular sería la pinza al estacionarse en el eje y producir los rayos X.

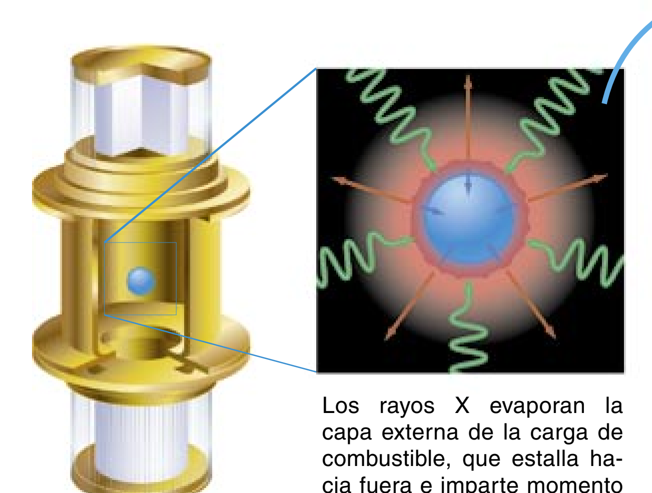
Con métodos muy dispares se pretendió crear plasma más uniforme; por ejemplo, emplear capas finas de metal o una nube hueca de gas para la conducción de la corriente eléctrica. Pero ningún método tuvo especial éxito.

El salto decisivo se dio en 1995. Thomas W. L. Sanford, con muchos hilos de aluminio, y luego Christopher Deeney y Rick B. Spielman, con 400 filamentos de tungsteno, lograron en Sandia la uniformidad que se necesitaba. Las pinzas Z de muchos hilos se idearon a finales de los años setenta para elevar, de uno a cinco kiloelectronvolts, la producción de energía de los rayos X. Ocurrió ello en Physics International, una empresa privada interesada en la generación de rayos X como fuente de estudio de la radiación. Pero los aceleradores de baja corriente disponibles por entonces no podían suministrar la energía eléctrica suficiente para producir la implosión de una multitud de filamentos.

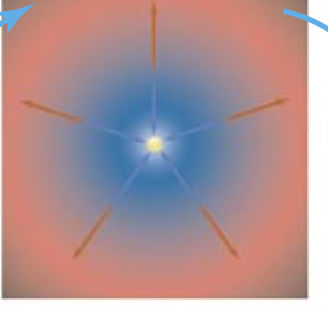
Tras los experimentos de 1995, Barry M. Marder, de Sandia, sugirió que la clave era poder disponer de hilos distribuidos de suerte tal que, cuando explotasen al paso de la corriente, se fundiesen entre sí y se creara una capa cilíndrica de plasma, casi uniforme y en implosión. Posteriores experimentos realizados en Sandia demostraron que el deseado núcleo central caliente se produce una vez la capa de plasma ha sufrido una implosión sobre un cilindro de espuma situado en el eje *z*. Añádase a ello lo sugerido por determinados experimentos ejecutados en la Universidad de Cornell, a saber, que quizá no todos los hilos se convierten en plasma enseguida. Podría quedar un núcleo frío de hilo rodeado de plasma, con lo que la corriente sigue fluyendo cierto tiempo, lo que redunda en un mayor rendimiento de la pinza.

Esta gavilla de avances espectaculares empezó a cosecharse hace tres años en el acelerador Saturno, de 10 millones de ampères, instalado en Sandia. A partir de octubre de 1996 siguieron en la máquina Z, de 20 millones de ampères, que produce ahora los impulsos de rayos X más potentes y de mayor energía del mundo. En un experimento típico generamos alrededor de los dos millones de joules de rayos X en nanosegundos, una potencia de más de 200 terawatts.

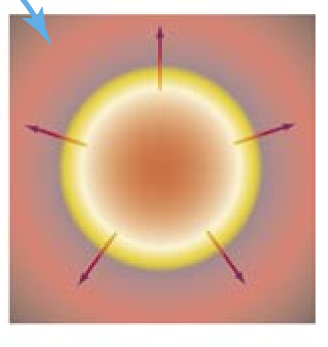
Aumentamos la potencia de los rayos X un 45 por ciento, hasta 290 terawatts, con una serie de experimentos que empezamos en noviembre de 1997 y en los que colocamos un doble enrejado de hilos. La corriente evapora la jaula exterior; el campo magnético empuja el material vaporizado hacia dentro. Las partes más veloces golpean la jaula interior y se frenan; las partes más lentas terminan por alcanzarlas y barren el material hacia el interior del enrejado interno. Esta geometría reduce las inestabilidades en la implosión; cuando los materiales vaporizados chocan en el eje *z* crean un impulso de rayos X más breve de lo que se podría con un enrejado sólo de hilos. Semejante geometría de doble jaula ha producido una temperatura de radiación de 1,8 millones de grados.



Los rayos X evaporan la capa externa de la carga de combustible, que estalla hacia fuera e imparte momento hacia dentro al combustible de hidrógeno.



La carga sufre una implosión y su volumen pasa a ser de 1/1000 a 1/10.000 del original; la fusión empieza cuando la temperatura alcanza los 120 millones de grados o más.



El frente de ondas del hidrógeno en fusión se expande hacia fuera y se enfría hasta que la fusión cesa.

6. MODO EN QUE LOS RAYOS X procedentes de la pinza causarían la implosión de la carga de combustible y pondrían en marcha la fusión en una cámara (*hohlraum*) esquematizada. En el acelerador X-1 propuesto, la culminación sería la implosión, en unos 10 nanosegundos, de una carga de combustible del tamaño de un grano de pimienta hasta que su tamaño se redujese al del punto final de esta frase.

En otros experimentos en Z, dirigidos por Arthur Toor, del Livermore, se recurrió a capas de espuma que ceñían un tubo de berilio insertado en un enrejado simple de filamentos para provocar una implosión más lenta y simétrica del plasma de la pinza Z; las temperaturas de la cámara (*hohlraum*) resultantes fueron también mayores. Se necesitaron 40 años para obtener 40 terawatts de potencia de rayos X con una pinza Z. Ahora, en tres, nos hemos acercado mucho más a nuestro objetivo final, cifrado en los 1000 terawatts y 16 millones de joules de rayos X, que producirían las temperaturas de tres millones de grados en la cámara necesarias para una fusión de alto rendimiento.

Sabíamos que la potencia pulsante sería más eficaz y menos costosa que el método del láser. Así ocurrió. Nuestro acelerador Z produce ahora una energía de rayos X total que se cifra en un 15 por ciento de la energía eléctrica que se aplica; la eficacia equivalente del láser Nova del Lawrence es de 0,1 por ciento. Las mejoras de diseño podrían alcanzar el 0,5 por ciento en la Instalación Nacional de Ignición, pero la limitada eficacia intrínseca del proceso láser impide sacarle mayor rendimiento a los aparatos.

A los pulsos intensos de rayos X pueden dárseles muchas aplicaciones. Las energías y la potencia obtenidas con la máquina Z permiten ya mediciones de laboratorio de propiedades de materiales y estudios del transporte de la radiación a densidades y temperaturas que antes sólo se alcanzaban en las explosiones nucleares subterráneas. Estos experimentos de laboratorio, y la producción de la fusión que un dispositivo con una corriente superior ofrecería, forman parte del programa norteamericano de gestión de armas nucleares, cuyo objetivo es garantizar la seguridad y fiabilidad de ese arsenal.

Admiten incluso aplicaciones astrofísicas. Las fuentes de rayos X que alimentan la máquina Z producen plasmas parecidos a los de las capas más exteriores de una estrella. La producción de luz de un tipo de estrella pulsante, las cefeidas variables, se conoce mejor ahora gracias a los datos obtenidos en 1996 por Paul T. Springer, del Lawrence en Livermore, en experimentos que realizó con la pinza Z en el acelerador Saturno. Cabe esperar que otros datos vayan despejando el misterio de las supernovas. Los plasmas de laboratorio ofrecen además la posibilidad de nuevos estudios de física atómica y de los láseres de rayos X.

Por lo que atañe a su calidad de fuente de rayos X, vale la pena destacar la eficacia y capacidad reproductora de la pinza Z. En su repetición los experimentos arrojan las mismas magnitudes de potencia y energía de rayos X, aun cuando no podamos predecir con detalle qué es lo que pasa. Sí podemos, en cambio, prever la escala: cuando doblamos la corriente la energía de rayos X se cuadruplica; se cumple una simple ley del cuadrado. Y como la teoría nos faculta para esperar en una radiación térmica, la temperatura de la pinza aumenta con la raíz cuadrada de la corriente. Si semejante comportamiento físico persiste, con otro incremento de la corriente en un factor de tres —hasta los 60 millones de ampères— llegaríamos a la energía, potencia y temperatura necesarias para provocar la fusión y obtener el alto rendimiento.

¿Qué problemas hay que resolver antes? De entrada, determinar si podemos embutir una corriente tres veces mayor en el mismo contenedor. Que sí se puede producir en la pinza Z esa enorme concentración de potencia dentro de cámaras mínimas lo sabemos desde hace casi 30 años en el Instituto Kurchatov, en Physics International y en Sandia. Lo normal es que los campos eléctricos tiendan a perturbar la corriente que los causa; ahora bien, merced al fenómeno de aislamiento magnético, pueden transmitirse pulsos eléctricos, potentes y cortos, a lo largo de un canal entre dos superficies metálicas, sin que se interrumpan y sin perder apenas energía. El campo magnético del pulso hace que éste se mantenga, ya que sobrepuja el campo eléctrico que, si no, causaría

su rotura. En los experimentos que John L. Porter, de Sandia, efectuó con la máquina Z en abril de 1998 se mantuvo abierto un hueco de 1,5 milímetros entre un enrejado de hilos y la pared inmóvil de la cámara (*hohlraum*) circundante; lo consiguió gracias al aislamiento magnético, pese a la intensa radiación. La temperatura de la cámara llegó a los 1,7 millones de grados.

Se transmiten 50 terawatts al minúsculo espacio existente entre los hilos y la pared de la cavidad; la densidad de potencia llega a los 25 terawatts por centímetro cuadrado. Si incrementásemos la potencia hasta 150 terawatts a 60 millones de ampères, la densidad de potencia subiría hasta 75 terawatts por centímetro cuadrado. Este aumento plantea nuevos problemas, pues la presión material en la pared metálica crecerá de 1,5 a tres millones de atmósferas.

Otras incógnitas tienen que ver con la eficacia de la conversión en rayos X, si seguirá siendo ese 15 por ciento que se obtiene con 20 millones de ampères; con las inestabilidades, si se mantendrán bajo control, y con el impulso de radiación que dé en la carga, si podremos conseguir que tenga la simetría y la forma que según los cálculos de los ordenadores se le exigirán.

Otro paso importante es la elaboración de modelos predictivos que calibren la compleja física del proceso. Las simulaciones bidimensionales disponibles han permitido avanzar en el conocimiento de la física de las pinzas; no obstante, pese a estar limitados a dos dimensiones, demandan una potencia ingente de cálculo. La simulación de la naturaleza magnética, hidrodinámica y radiativa tridimensional de la pinza en su integridad trasciende nuestras posibilidades actuales. Con todo, el progreso en la computación de altas prestaciones y en la interpretación de la formación de imágenes de rayos X se van beneficiando de los avances que logramos con la potencia radiada. En 1998 hemos estado haciendo 1,8 billones de operaciones de coma flotante (multiplicaciones o divisiones) por segundo (teraflops) con el ordenador Janus. En Sandia y Los Alamos se está preparando un modelo informático que simula la física de la pinza y del transporte de radiación a la carga. Con la llegada de estos instrumentos, aplicados con la nueva generación de superordenadores, esperamos que continúe nuestro rápido progreso en el desarrollo de pinzas Z para la fusión.

En Sandia se piensa ya en la etapa siguiente. A finales de marzo solicitamos aprobación del departamento de energía para proyectar la sucesora de la máquina Z, la X-1, que nos ofrecería 16 megajoules de radiación y gracias a la cual, creemos, llegaríamos al alto rendimiento. Es pronto para hablar de costes, pero se barajan los 400 millones de dólares. Debe recordarse que las máquinas Z y X-1 y la Instalación Nacional de Ignición son útiles de investigación. Z podría conseguir las condiciones necesarias para la fusión, la Instalación debería lograr la ignición y X-1, construida teniendo en cuenta lo que ésta enseñe, debería lograr el alto rendimiento. De ninguno de los tres experimentos se espera, sin embargo, que proporcione una fuente comercial de energía eléctrica.

Repitiendo una frase que ha hecho fortuna, "es difícil hacer predicciones, sobre todo del futuro", pero si podemos ponernos enseguida a diseñar y construir el próximo escalón veremos culminada nuestra tarea así que pasen 10 años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEUTRON PRODUCTION IN LINEAR DEUTERIUM PINCHES. O. A. Anderson, W. R. Baker, S. A. Colgate, J. Ise y R. V. Pyle en *Physical Review*, vol. 110, núm. 6, págs. 1375-1387; 1958.

X-RAYS FROM Z-PINCHES ON RELATIVISTIC ELECTRON BEAM GENERATORS. N. R. Pereira y J. Davis en *Journal of Applied Physics*, volumen 64, núm. 3, páginas R1-R27; 1988.

FAST LINERS FOR INERTIAL FUSION. V. P. Smirnov en *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 33, núm. 13, págs. 1697-1714; noviembre 1991.

DARK SUN: THE MAKING OF THE HYDROGEN BOMB. Richard Rhodes. Simon & Schuster, 1995.

Z-PINCHES AS INTENSE X-RAY SOURCES FOR HIGH-ENERGY DENSITY PHYSICS APPLICATIONS. M. Keith Matzen en *Physics of Plasmas*, vol. 4, número 5, Parte 2, págs. 1519-1527; mayo de 1997.

Cepas mejoradas de *Rhizobium*

Con el fin de alcanzar mayor rendimiento en la fijación biológica del nitrógeno, se investigan las posibilidades de modificación genética de las bacterias involucradas. Los avances en ese campo permiten reducir el uso de abonos químicos

Esperanza Martínez Romero, Rafael Palacios y Jaime Mora

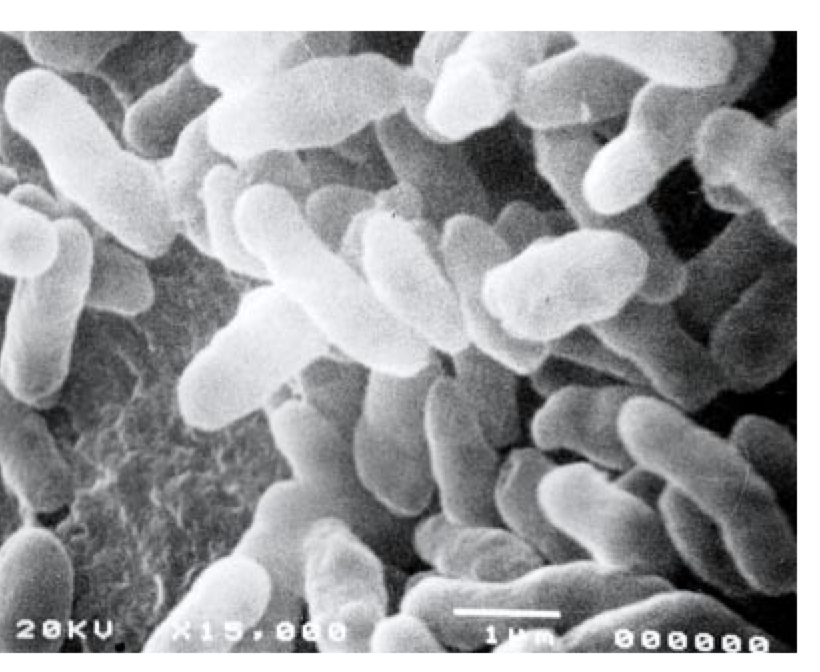
La revolución verde de los años sesenta trajo un notable incremento de la producción agrícola, gracias, sobre todo, al empleo generalizado de abonos químicos y semillas mejoradas. Pero el fertilizante nitrogenado, el más utilizado en agricultura, se lleva buena parte de la inversión en el campo. Para la fabricación de fertilizantes nitrogenados se requiere en general energía derivada del petróleo. Por otro lado, su uso indiscriminado ha ocasionado graves problemas de contaminación, ya que no todo el fertilizante que se aplica lo aprovecha la planta; en una cuantía importante acaba en lagos y lagunas.

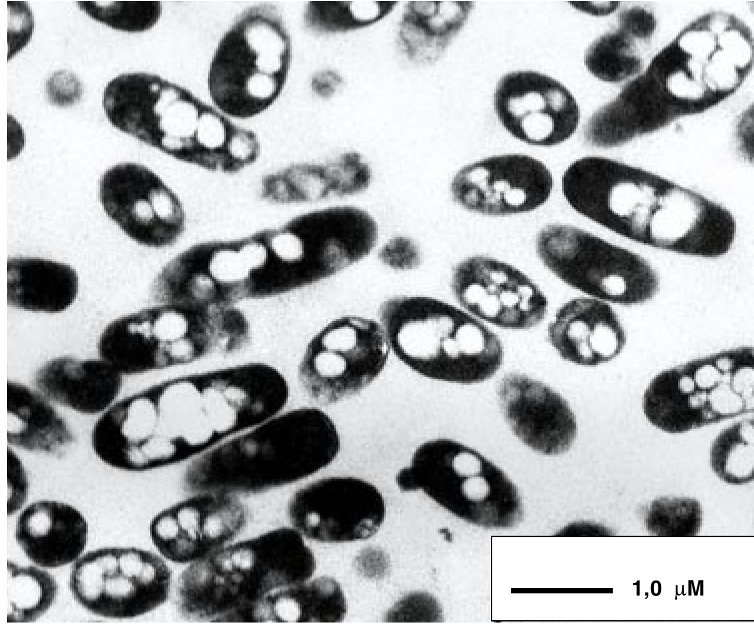
La fijación biológica de nitrógeno es la opción alternativa y natural de la fertilización química. De todos los seres vivos, sólo un centenar de géneros de bacterias están capacitados para fijar nitrógeno del aire, donde este elemento constituye alrededor del 70 %, y convertirlo en compuestos asimilables por todos los organismos.

Entre las especies fijadoras de nitrógeno hay cianobacterias (*Anabena* y *Nostoc*, por ejemplo), arqueobacterias (*Methanococcus*), bacterias grampositivas (así, *Frankia* y *Clostridium*), enterobacterias (*Klebsiella*) y otras proteobacterias (*Rhizobium*, *Azospirillum* y *Acetobacter*, entre varias).

En la fijación biológica de nitrógeno el mundo orgánico halla su fuente principal de abastecimiento en dicho elemento. Si se suspendiera el proceso de fijación, todo el nitrógeno retenido en la biomasa regresaría a la atmósfera en 100 años. De poder fijar nitrógeno, el hombre no necesitaría ingerir proteínas. Pero la ambición de los científicos no es que el hombre fije nitrógeno, sino que los cultivos altamente extractivos de nutrientes del suelo puedan prescindir del uso de fertilizantes mediante la fijación biológica de nitrógeno.

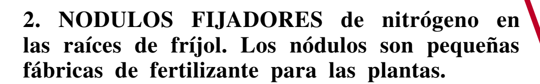
En la naturaleza ya existen plantas que aprovechan la fijación de nitrógeno realizada por bacterias que se asocian con los vegetales. Ocho familias de plantas emparentadas entre sí gozan de la capacidad para asociarse en simbiosis con bacterias





1. BACTERIAS fijadoras de nitrógeno de fríjol. Se trata de la especie *Rhizobium etli*, en una fotografía tomada (*a la izquierda*) con el microscopio de barrido y, (*a la derecha*), con el microscopio electrónico de transmisión. Nótense los gránulos blancos de poli-β-hidroxibutirato dentro de las bacterias.





2. NODULOS FIJADORES de nitrógeno en las raíces de fríjol. Los nódulos son pequeñas fábricas de fertilizante para las plantas.

fijadoras de nitrógeno. Las plantas en cuestión alojan a las bacterias en estructuras especiales que se forman en sus raíces; en los nódulos, nombre de esas estructuras, las bacterias fijan el nitrógeno.

Individuos de los géneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* y *Azorhizobium* penetran en las raíces y a veces en los tallos de las leguminosas, mientras que *Frankia* y otros actinomicetos son las responsables de la fijación de nitrógeno en *Casuarina* y otras especies.

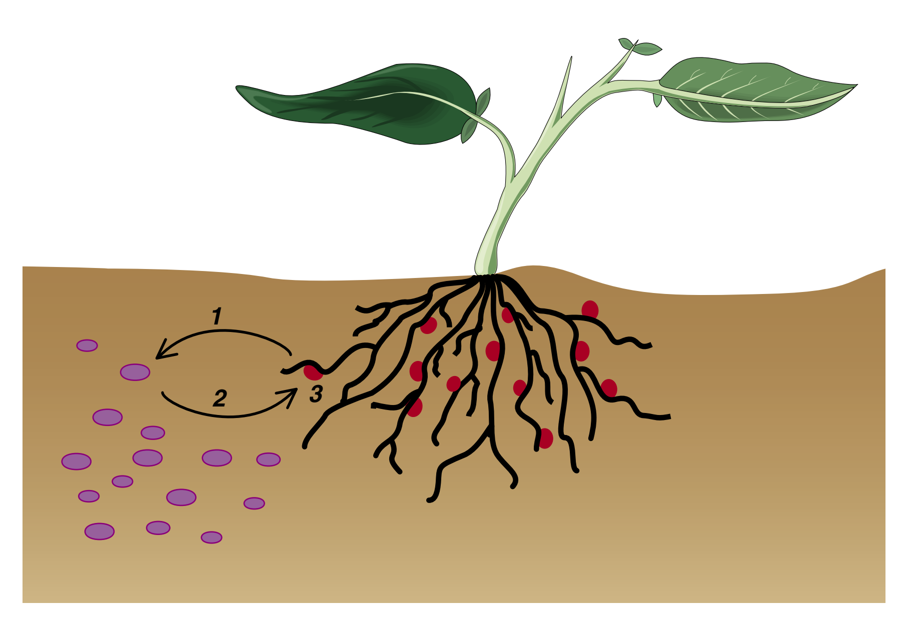
Las leguminosas se cuentan entre las familias más numerosas, con unas 19.000 especies distribuidas por ambientes muy dispares. Se admite que deben tamaño éxito adaptativo a su capacidad para fijar nitrógeno, lo que les permite colonizar suelos pobres en nutrientes. Pero no todas las especies están capacitadas para formar nódulos; tampoco se sabe cuántas establecen simbiosis. Las más conocidas son las que tienen valor comercial y alimentario para el ser humano o para el ganado, como el fríjol, la soja, el chícharo, la lenteja, el haba y la alfalfa. Todas ellas fijan nitrógeno atmosférico al establecer simbiosis con *Rhizobium* y otros géneros emparentados.

ESPERANZA MARTINEZ-ROMERO, RAFAEL PALACIOS y JAIME MORA son investigadores y profesores del Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno, adscrito a la Universidad Nacional Autónoma de México. Han publicado numerosos trabajos sobre ecología, genética y fisiología de la fijación simbiótica de nitrógeno.

En comparación con el gran número de leguminosas, sólo se han identificado unas 15 especies de *Rhizobium*, tres de *Bradyrhizobium* y una de *Azorhizobium*. Por eso se sospecha que debe de haber una cifra elevada de especies de estas bacterias por describir. Los individuos de los géneros citados moran en el suelo y habitan en las zonas geográficas donde existe la planta con la que establecen simbiosis. En China, por ejemplo, hay una gran diversidad de bacterias capaces de nodular en la soja, pues ésta es originaria de Asia; mientras que en México no hay simbiontes de soja y sí una extensa variedad de *Rhizobium* simbiontes de fríjol, ya que éste es nativo de la región.

El estudio de las poblaciones de bacterias fijadoras de nitrógeno de fríjol de México y de Sudamérica nos llevó a proponer dos nuevas especies de *Rhizobium*. A una de ellas la llamamos *R. etli*, porque "etl" significa fríjol en náhuatl, y a la otra la denominamos *R. tropici*, por la región donde medra. *R. etli* también se encuentra en los lugares donde se ha introducido el fríjol, en España por ejemplo. Hemos hallado *R. etli* en las semillas de fríjol, lo que induce a suponer la existencia de un posible mecanismo de dispersión geográfica del *Rhizobium* conjuntamente con fríjol en tiempos históricos.

Dentro de una misma especie de *Rhizobium* observamos un grado de diversidad amplísimo. Proporcionalmente, la disparidad entre bacterias pudiera compararse con la distancia que separa al hombre de la gallina. La investigación de campo realizada en Nueva Zelanda sugiere un modelo explicativo sobre cómo pudo aumentar la diversidad de especies de *Rhizobium*. En su trabajo experimental, los investigadores añadieron



3. LA INTERACCION LEGUMINOSA-*RHIZOBIUM* se inicia con un intercambio de señales químicas entre plantas y bacterias. Los compuestos (*1*) que excretan las plantas por sus raíces los reconoce el *Rhizobium* correspondiente; en respuesta, los bacteroides producen (*2*) factores Nod que estimulan en la planta el desarrollo de nódulos (*3*), en los que se albergan las bacterias que fijan nitrógeno.

al suelo (como inoculante) bacterias de *Rhizobium loti* (ahora reclasificado como *Mesorhizobium*) para nodular en la planta *Lotus*, ya que en esos campos no había bacterias simbiontes de *Lotus*. El resultado fue toda una sorpresa: al recuperar las bacterias de los nódulos observaron que los aislados no correspondían con la bacteria introducida. La información genética para la simbiosis con *Lotus* se había transferido de la bacteria inoculada a distintas bacterias existentes en ese suelo. De ese modo se reclutaron nuevos tipos de *Mesorhizobium* con capacidad para nodular *Lotus*.

Por nuestra parte, hemos comprobado que, en suelos de México, las *R. etli* que carecen de capacidad para nodular y fijar nitrógeno en fríjol abundan más que las bacterias simbióticas. Creemos que esa capacidad puede, en condiciones naturales, transferirse entre estas bacterias. Por otro lado, la diversidad genética bacteriana tendría que ver con la manifiesta habilidad para sobrevivir y adaptarse a distintas condiciones de suelo y clima, así como para acoplarse a las variaciones que también existen dentro de las plantas de una misma especie.

Gracias a la diversidad intraespecífica que ofrecen *Rhizobium* y *Bradyrhizobium* se ha dispuesto de un acervo valioso para seleccionar las mejores cepas. Se han logrado así linajes óptimos para la fijación del nitrógeno, en cuanto han colonizado campos de cultivo. Buena parte del éxito de la producción de soja en Brasil (segundo productor mundial) hemos de atribuirlo al empleo de cepas de *Bradyrhizobium* que alcanzan máximo rendimiento en simbiosis.

En Brasil no hay simbiontes naturales de soja, por eso, la inoculación de bacterias del género *Bradyrhizobium* permitió el aprovechamiento de la fijación de nitrógeno en los cultivos de soja cuando éste se introdujo en ese país. En México, por el contrario, los experimentos de inoculación del fríjol han sido poco exitosos debido a un problema espinoso. La población nativa de *Rhizobium etli*, extensa, diversa y altamente competitiva, impide que las cepas introducidas como inoculante formen nódulos. Para resolver esta dificultad, varios grupos de distintos países, incluido el nuestro, abordaron el estudio de la competencia de *Rhizobium* para crear nódulos.

En nuestro caso, la construcción de cepas híbridas, quimeras que obtuvimos entre las dos especies de *Rhizobium* simbiontes de fríjol, nos proporcionó bacterias con redoblada capacidad de nodulación y de competencia en plantas de fríjol. A ello hemos de agregar que las amplificaciones genómicas obtenidas mediante una estrategia que permite aumentar la dosis de algunos de los genes relacionados con el proceso simbiótico, nos han sido útiles para reforzar la competitividad en algunas cepas de *Rhizobium*.

Se ha visto que las cepas de *Rhizobium* que producen antibióticos (por ejemplo trifolitoxina) van ocupando el terreno de las incapaces de sintetizarlos. Una vez aislados, los genes de producción de trifolitoxina se han incorporado en cepas de interés haciéndolas más competitivas. En otra línea de trabajo se modificaron genéticamente plantas de alfalfa para que produjeran nutrientes idóneos para las cepas que participan en la nodulación.

La contribución de nitrógeno del *Rhizobium* a las leguminosas varía entre el 30 y el 85 % de lo que la planta requiere. En la cota inferior se halla el fríjol, una de las leguminosas con menor capacidad para fijar nitrógeno. En Australia se han logrado plantas de soja hipernodulantes; producen de 3 a 5 veces más nódulos e incrementan las cosechas. En el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de México se ha iniciado la selección de variedades de fríjol con capacidades de fijación de nitrógeno altas. En este ámbito, importa seleccionar variedades resistentes a patógenos y enfermedades en ausencia de fertilizantes químicos, ya que así se coseleccionan las características favorables para la simbiosis al mismo tiempo que alguna otra resistencia requerida.

Los trabajos realizados por otros investigadores en el Centro de Investigación sobre Fijación del Nitrógeno mostraron que las cepas de *R. etli* dotadas de una mayor capacidad respiratoria fijaban con más eficacia el nitrógeno. De nuestras investigaciones sobre el metabolismo del carbono y del nitrógeno en *Rhizobium*, se desprendió que las cepas de *R. etli*, a las que se les redujo la síntesis de poli-β-hidroxibutirato (un polímero que es un reservorio de carbono), mostraban en simbiosis una mayor capacidad de utilizar el carbono que les cedía la planta para fijar nitrógeno, lo que repercutía en un desarrollo mayor de las plantas y en un mayor contenido de nitrógeno en las semillas.

Dentro de esa línea de trabajo hemos proyectado un programa para mejorar la simbiosis de *Rhizobium etli* y especies con ella emparentadas que infectan fríjol. Se han caracterizado cepas indígenas de Centro

América (de *R. etli* y especies cercanas), seleccionadas en razón de su alta capacidad de fijación del nitrógeno molecular (N_2). Estas cepas han demostrado, en estudios de invernadero, poseer una capacidad más que mediana para fijar N_2 también con las variedades de fríjol comunes en el campo en México, capacidad que se refleja en una mayor actividad de nitrogenasa y un mayor contenido de nitrógeno en las semillas.

Ha comenzado la fase de ensayo en campos de cultivo. Se han inoculado plantaciones de fríjol. De modo paralelo, en el laboratorio investigamos hasta qué punto la elevada capacidad de fijación de nitrógeno depende de la regulación de los genes estructurales de la nitrogenasa. A propósito de estos genes estructurales que cifran la enzima nitrogenasa, hemos descubierto ya que una de las tres reiteraciones de *R. etli* tiene un solo gen *nifH* de la nitrogenasa y no los genes *nifD* y *K*, que son los habituales en fijación.

El promotor del gen *nifH* es más fuerte que el de las otras dos reiteraciones que llevan todos los genes estructurales de la nitrogenasa (*nifHDK*). En el laboratorio hemos añadido el promotor fuerte de *nifH* a los genes estructurales de la nitrogenasa *nifHDK* al objeto de que ahora su transcripción sea óptima. Cuando esta reiteración modificada se introduce a *R. etli* y se infecta fríjol con esta cepa, crecen significativamente la fijación y el contenido de nitrógeno de la planta. El beneficio que pueda extraerse de tales modificaciones se evaluará muy pronto en campos experimentales.

Desde hace unos 20 años se sabe que en la mayoría de las especies de *Rhizobium* la información genética para la simbiosis se encuentra confinada en plásmidos, moléculas de ADN independientes del cromosoma bacteriano, aunque de su misma naturaleza y menor tamaño. Se conoce ya la secuencia completa del plásmido simbiótico de una cepa de *Rhizobium* con amplio rango de nodulación, conocimiento que pronto se extenderá a otras especies de *Rhizobium*.

Aunque se han producido avances importantes en el desciframiento de la interacción planta-*Rhizobium*, seguimos sin conocer el repertorio completo de los genes bacterianos y vegetales involucrados en el proceso. Planta y simbionte específico representan un sistema único con particularidades únicas. El proceso interactivo se inicia desde el despertar del *Rhizobium* dormido o en estado latente en el que se encuentra en el suelo. Las condiciones que son propicias para la germinación de la semilla (básicamente, disponibilidad de agua) constituyen también una señal para activar al *Rhizobium*. A ello hemos de añadir ciertas vitaminas, la biotina en particular. Los nutrientes escasean en el suelo; las superficies de las raíces, por contra, son ricas en azúcares, aminoácidos y vitaminas. Los *Rhizobia* son atraídos mediante quimiotaxis a algunos de estos compuestos y a otros de tipo flavonoide.

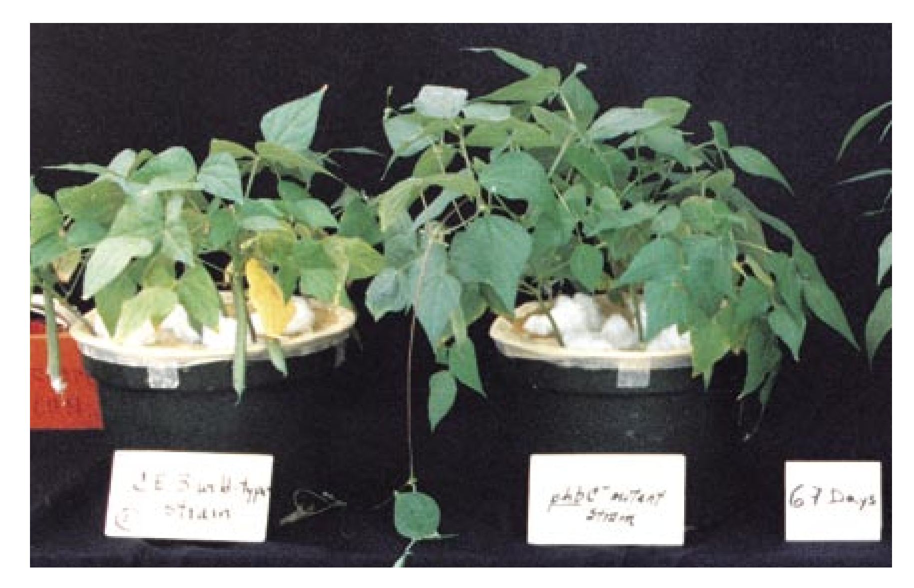
Las leguminosas varían de acuerdo con los diferentes tipos de flavonoides que excretan. Estas moléculas dotadas de anillos aromáticos cumplen una función clave en el reconocimiento específico de las bacterias. En respuesta a los flavonoides, las bacterias producen factores Nod (de nodulación), unos compuestos de estructura novedosa.

Los factores Nod purificados inducen la formación de nódulos en las raíces en ausencia de las bacterias. Las modificaciones químicas operadas en los factores Nod se han asociado con la nodulación selectiva de leguminosas. Por ejemplo, un sulfato unido en uno de los extremos de la molécula Nod y un lípido especial en el otro son requisito para que ésta promueva la nodulación de la alfalfa.

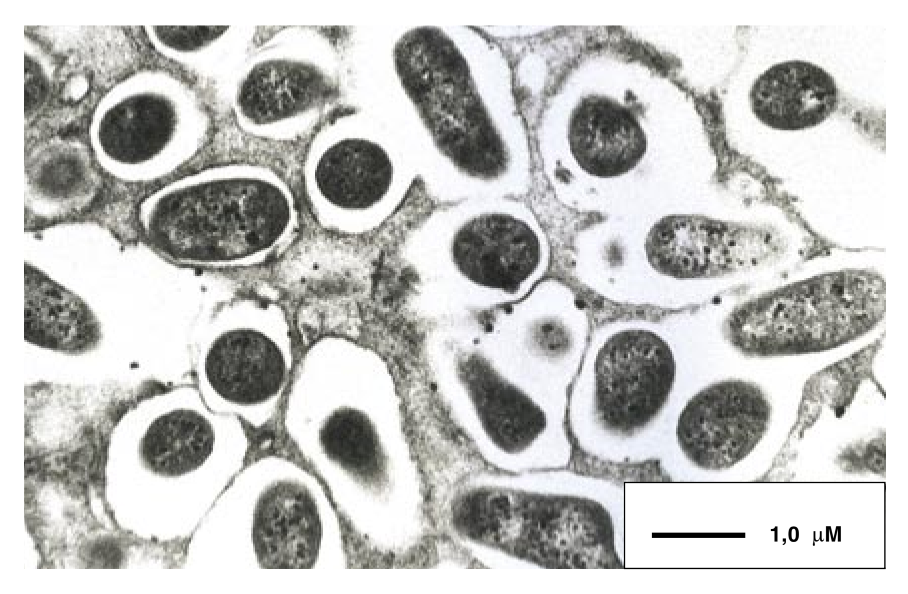
En nuestro laboratorio hemos caracterizado la estructura de los factores Nod de *R. etli* y *R. tropici*. Y comprobamos que, si bien ambas especies pueden nodular fríjol, producen factores Nod distintos. En el futuro el análisis de los receptores del factor Nod del fríjol permitirá entender las bases moleculares de su falta de especificidad, con el propósito último de modificarlos para hacer al fríjol selectivo hacia las cepas mejoradas de *Rhizobium*.

Por lo que hoy sabemos, los factores de nodulación representan una familia de morfógenos más generales que intervienen en procesos de diferenciación de plantas y animales. Tras descubrirse los factores Nod en *Rhizobium*, otros compuestos semejantes parecen actuar durante la embriogénesis de la zanahoria y durante el desarrollo de peces. Cuando se agregaron factores Nod a mutantes de zanahoria, prosiguió su desarrollo normal; en el sapo *Xenopus laevis* se ha encontrado una proteína de

4. LOS BACTEROIDES de *Rhizobium* dentro de los nódulos llevan a cabo la fijación de nitrógeno mediante la enzima nitrogenasa. Este proceso resulta costoso en energía y poder reductor que se genera en la bacteria mediante el ciclo de Krebs. Cuando se impidió la síntesis de poli-β-hidroxibutirato (PHB) mediante una mutación (*representada por una barra*) se incrementó la fijación de nitrógeno en *Rhizobium etli*.







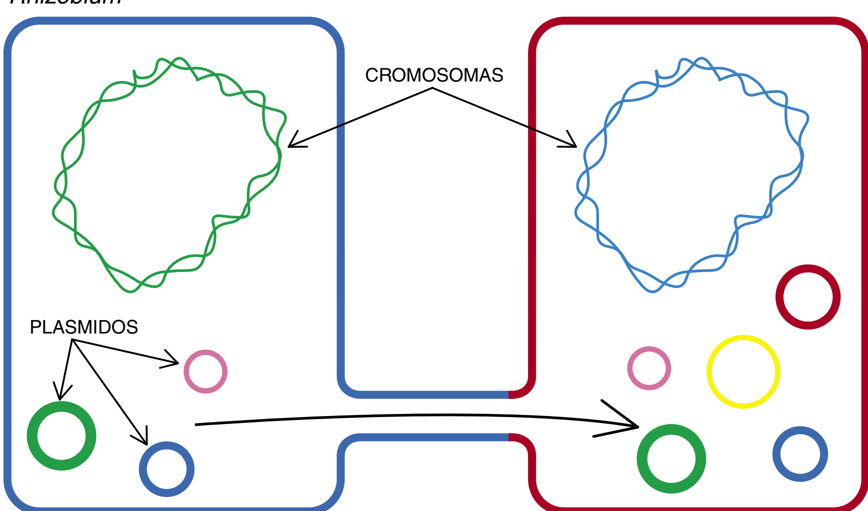
5. PLANTAS DE FRIJOL (*fotografía superior*) inoculadas con *R. etli* y con *R. etli* mutado en las síntesis de poli-β-hidroxibutirato (PHB). Los bacteroides del interior de los nódulos de la cepa silvestre muestran gránulos de PHB (*fotografía central*), gránulos que no se aprecian en los nódulos de la cepa mutada (*fotografía inferior*).

desarrollo que se expresa durante la gastrulación, muy similar a una de las enzimas que sintetiza el factor Nod en *Rhizobium*.

En diversos laboratorios de distintos lugares del mundo se están investigando los efectos moleculares que los factores Nod ejercen en las plantas. En unos casos esos factores inducen la división de células vegetales y la producción de proteínas específicas de nódulos; en otros, promueven la formación de un hilo de infección que es la vía normal de acceso de la bacteria al interior de la raíz. En el hilo de infección se requiere la división celular de las bacterias y la integridad de su estructura externa. Si la bacteria no crece con la debida celeridad o no corresponde al simbionte específico, se detiene la simbiosis. Se cree que la planta en este caso desconoce al simbionte y, al tomarlo como patógeno, responde con sus mecanismos de defensa normales.

Una vez en el interior del nódulo, la bacteria se diferencia en una forma llamada bacteroide y deja de dividirse. Se establece entonces una íntima relación metabólica entre la planta y la bacteria, por la que la planta suministra compuestos derivados de la fotosíntesis a cambio del amonio producto de la fijación de nitrógeno. El oxígeno contenido en concentraciones limitadas dentro del nódulo constituye una importante señal de diferenciación de la bacteria; se le supone responsable de la expresión de las nitrogenasas, las enzimas de la fijación de nitrógeno. En condiciones casi anóxicas, el *Rhizobium* no puede fijar nitrógeno en vida libre; ello mueve a pensar que se requieren otras señales de la planta para que el *Rhizobium* fije nitrógeno dentro del nódulo.

Las investigaciones realizadas entorno al proceso simbiótico han permitido crear, mediante manipulación genética, cepas de *Rhizobium meliloti* (simbiontes de alfalfa) con una capacidad fijadora de nitrógeno incrementada al presentar el microorganismo un mayor número de copias de los genes involucrados en el transporte de dicarboxílicos, la fuente de carbono preferencial del *Rhizobium*. Una mayor expresión de un gen que regula la transcripción de los genes de nitrogenasa también mejora la fijación de nitrógeno de *R. meliloti* en simbiosis con la alfalfa. De esa misma bioingeniería genética se ha beneficiado *R. etli*,



6. LOS PLASMIDOS en *Rhizobium* son moléculas de información genética independientes del cromosoma. En la mayoría de las especies de *Rhizobium* se ha observado que los genes para la nodulación y para la fijación de nitrógeno se hallan en el plásmido simbiótico. Además de éste, se ha encontrado que otros plásmidos participan en la interacción con la planta. Los plásmidos pueden transferirse de una bacteria a otra. Aprovechando esa posibilidad, hemos construido cepas quiméricas o híbridas entre especies con mayor capacidad para nodular.

que así fija con mayor rendimiento nitrógeno en fríjoles.

La simbiosis de *Rhizobium* con plantas leguminosas, en especial con alfalfa, se ha convertido en modelo para otros dominios de la biología. Se trata, en definitiva, de desentrañar los mecanismos moleculares subyacentes bajo la interacción entre la bacteria y la planta, cuyo dominio habrá de posibilitar quizá que los cereales y otras plantas de interés agrícola fijen nitrógeno.

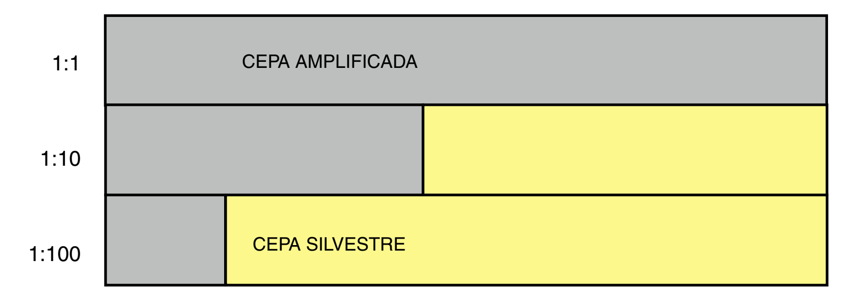
Algún paso se ha dado ya. Se han descubierto otras modalidades de interacción de bacterias fijadoras de nitrógeno en el interior de la caña de azúcar y de algunos pastos kallar. En este tipo de asociación no se forman nódulos, sino que las bacterias viven dentro de los tallos, hojas y raíces. Por eso se les ha llamado endófitas. En caña de azúcar la fijación biológica de nitrógeno puede aportar hasta el 80 % de lo que el cultivo requiere.

De acuerdo con nuestras investigaciones, *Acetobacter diazotrophicus* podría ser la bacteria fijadora principal de la caña. Hemos descubierto que el fertilizante químico disminuye las poblaciones de *A. diazotrophicus* y su diversidad genética, además de inhibir la colonización de la caña de azúcar por este microorganismo.

Por lo que se refiere a las bacterias aisladas del pasto kallar, sépase que, al fijar nitrógeno, están ayudando al desarrollo del arroz. Estos datos recientes han promovido la búsqueda de fijadores de nitrógeno dentro de otras plantas. En el CIFN se han encontrado nuevas bacterias fijadoras de nitrógeno del género *Acetobacter* dentro del café.

Los fijadores endófitos representan uno de los caminos para extender la fijación de nitrógeno a plantas no leguminosas de interés agrícola. En otro enfoque, muy ambicioso y de resultados inciertos, se trata de transformar genéticamente a los plásmidos de plantas, construyendo así plantas transgénicas con los genes de nitrogenasa a las que habrá que proporcionar todo lo necesario para su expresión y funcionamiento.

PRESENCIA DE *RHIZOBIUM TROPICI* AMPLIFICADA Y SILVESTRE EN LOS NODULOS



7. REDOBLADA CAPACIDAD COMPETITIVA de la cepa *R. tropici* cuyo genoma se ha amplificado al azar. La cepa amplificada forma un alto porcentaje de los nódulos en las raíces de las plantas probadas, en comparación con la cepa original, en todas las proporciones de bacterias inoculadas a la planta, donde la amplificada es, en uno de los casos, sólo una centésima de las bacterias añadidas a la raíz, y sin embargo forma alrededor del 20% de los nódulos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENETIC AND PHYSIOLOGICAL CHARACTERIZATION OF A *RHIZOBIUM ETLI* MUTANT STRAIN UNABLE TO SYNTHESIZE POLY-β-HYDROXYBUTYRATE. Miguel A. Cevallos, Sergio Encarnación, Alfonso Leija, Yolanda Mora y Jaime Mora en *Journal of Bacteriology*, vol. 178, n.º 6, páginas 1646-1654, marzo 1996.

RHIZOBIUM LIPO-CHITOOLIGOSACCHARIDE NODULATION FACTORS: SIGNALING MOLECULES MEDIATING RECOGNITION AND MORPHOGENESIS. Jean Dénarié, Frédéric Debellé y Jean-Claude Promé en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 65, páginas 503-535, 1996.

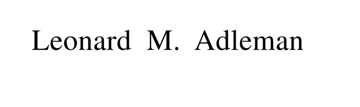
RHIZOBIUM PHYLOGENIES AND BACTERIAL GENETIC DIVERSITY. Esperanza Martínez-Romero y Jesús Caballero-Mellado en *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 15, n.º 2, páginas 113-140, marzo 1996.

GENERATION OF *RHIZOBIUM* STRAINS WITH IMPROVED SYMBIOTIC PROPERTIES BY RANDOM DNA AMPLIFICATION (RDA). Patrick Mavingui, Margarita Flores, David Romero, Esperanza Martínez-Romero y Rafael Palacios en *Nature Biotechnology*, volumen 15, páginas 564-569, junio 1997.

Computación con ADN

La manipulación de ADN orientada a la resolución de problemas matemáticos obliga a redefinir el término "computación"

Leonard M. Adleman





Ordenador. La palabra evoca imágenes de teclados y monitores. Nos vienen a la mente palabras como "ROM", "RAM", "gigabyte" y "megahertz". Nos hemos hecho a la idea de que la computación se efectúa por medio de componentes electrónicos construidos sobre un sustrato de silicio.

Pero, ¿ha de ser así? La computadora de que nos valemos para leer estas palabras se parece muy poco a un ordenador personal. Tal vez nuestra forma de concebir la computación sea demasiado restringida. ¿Y si las máquinas de cómputo fueran ubicuas y adoptasen multitud de formas? ¿No podría existir una computadora en fase líquida, que efectuase sus cálculos por interacción entre moléculas en disolución? Podría. Esta es la historia de la computación con ADN.

LEONARD M. ADLEMAN se doctoró en informática por la Universidad de California en Berkeley, en 1976. En 1977 ingresó como docente en el departamento de matemáticas del Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde se especializó en teoría algorítmica de números; fue uno de los inventores del sistema RSA, un criptosistema de clave pública. (La "A" de RSA es de "Adleman".) Es miembro de la Academia Nacional de Ingeniería de los EE.UU.

Mi participación en la misma arranca de 1993. Hasta entonces no había puesto los pies en un laboratorio de biología molecular. Aunque soy matemático e informático, había investigado un poquito sobre el sida, investigación no carente de importancia. Por desdicha, tuve muy poco éxito en comunicar mis ideas a los expertos en el tema. Queriendo, pues, ser más persuasivo, decidí empezar por conocer a fondo la biología del VIH. De ahí lo del laboratorio de biología molecular. En él, guiado por Nickolas Chelyapov (que es ahora jefe científico de mi propio laboratorio), comencé a estudiar los métodos de la biología moderna.

Era fascinante. Estaba creando con mis propias manos moléculas de ADN que no existían en la naturaleza. Y las estaba introduciendo en bacterias, donde impartían instrucciones de montaje para la producción de proteínas capaces de alterar la naturaleza misma del organismo.

Durante este período de aprendizaje intenso cayó en mis manos *Biología Molecular del Gen*, uno de cuyos autores es James D. Watson, que compartió el Nobel con Francis Crick. El concepto que yo tenía de la biología cambió de repente. La biología había dejado de ser la ciencia de cosas de un olor indescifrable que se guardaban en frigoríficos (la idea que conservaba desde mis días de estudiante en la Universidad de California en Berkeley, allá por los años sesenta). Esta ciencia estaba experimentando una revolución, adquiriendo rápidamente la profundidad y la potencia reservadas hasta entonces a la física. La biología consistía ahora en el estudio de la información almacenada en ADN —ristras de cuatro letras, *A*, *T*, *G* y *C*, símbolos de las bases adenina, timina, guanina y citosina— y de las transformaciones que esa información experimenta en el interior de la célula. ¡Aquí había matemáticas!

Cierta noche, leyendo el texto de Watson, llegué a la descripción de la ADN polimerasa. Es la reina de las enzimas, la creadora de vida. En condiciones apropiadas, dada una hebra de ADN, la ADN polimerasa produce

1. LAS MOLECULAS DE ADN, con sus secuencias de adenina, timina, citosina y guanina (representadas por las letras *A*, *T*, *C* y *G*), pueden servir para almacenar información y calcular. La molécula aquí mostrada en color, *GCAGTCGGACTGGGCTATGTCCGA*, determina la solución del caso particular del problema del camino hamiltoniano, que se expone en el recuadro ilustrado del artículo.

una segunda hebra complementaria —su complemento Watson-Crick— en la cual cada *C* es reemplazada por una *G*, cada *G* por una *C*, cada *A* por una *T*, y cada *T* por una *A*. Por ejemplo, si una molécula posee la secuencia *CATGTC*, la ADN polimerasa producirá una nueva molécula con la secuencia *GTACAG*. La polimerasa permite la reproducción de ADN, lo que a su vez posibilita la reproducción de las células y, en última instancia, la reproducción de uno mismo. Para un reduccionista estricto, la vida es la reproducción de ADN por medio de la ADN polimerasa.

La ADN polimerasa constituye una nanomáquina asombrosa, una molécula excepcional que "salta a horcajadas" sobre una hebra de ADN y por ella se desliza mientras lee cada base y escribe su complementaria sobre una hebra nueva, en crecimiento, de ADN. Reflexionando sobre esta enzima maravillosa, descubrí sorprendido su semejanza con un trabajo de Alan M. Turing, de 1936. Este famoso matemático británico —e independientemente de él, Kurt Gödel, Alonzo Church y S. C. Kleen— habían emprendido un estudio riguroso de la noción de "computabilidad". Un trabajo teorético que precedió en unos diez años al advenimiento de los ordenadores reales y fructificó en algunos de los principales resultados matemáticos del siglo XX.

Para tal estudio, Turing había inventado una computadora "de juguete", la "máquina de Turing". No tenía ninguna pretensión de que fuera un dispositivo real; se trataba, por contra, de un artefacto mental, idóneo para la investigación matemática. Por eso debía ser sumamente simple; Turing lo logró con brillantez. Una de las versiones de su máquina consistía en un par de cintas y un mecanismo de "control finito", que iba haciendo avanzar la cinta "de entrada", leyendo datos de ella, al mismo tiempo que movía la cinta "de salida", leyendo y escribiendo otros datos. El control finito se podía programar mediante instrucciones sencillas; además podía escribirse un programa que leyera en la cinta de entrada una ristra de signos *A*, *T*, *C* y *G*, y fuera escribiendo su ristra Watson-Crick complementaria en la cinta de salida. La semejanza con la ADN polimerasa era clamorosa.

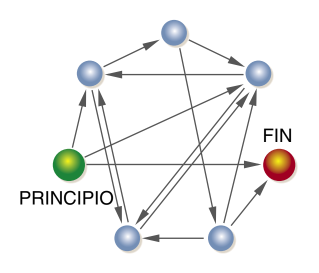
Pero había otro dato importante que confería a esta semejanza un carácter asombroso, a saber, la universalidad de la computadora de Turing. Pese a su sencillez, cabe programarla para que compute todo cuanto sea computable. (Esta proposición constituye, en esencia, la famosa "tesis de Church".) Dicho de otro modo, cabía programar una máquina de Turing para que produjese ristras Watson-Crick complementarias, para que descompusiera números enteros en sus factores primos, para que jugase al ajedrez, y así por menudo. Mas, ¿cómo aplicar el ADN a la resolución de problemas?

Mi primera idea fue construir una computadora de ADN a imagen de la máquina de Turing, en la que una enzima reemplazara al control finito. Una idea muy parecida había sido propuesta unos diez años antes por Charles H. Bennet y Rolf Lan-



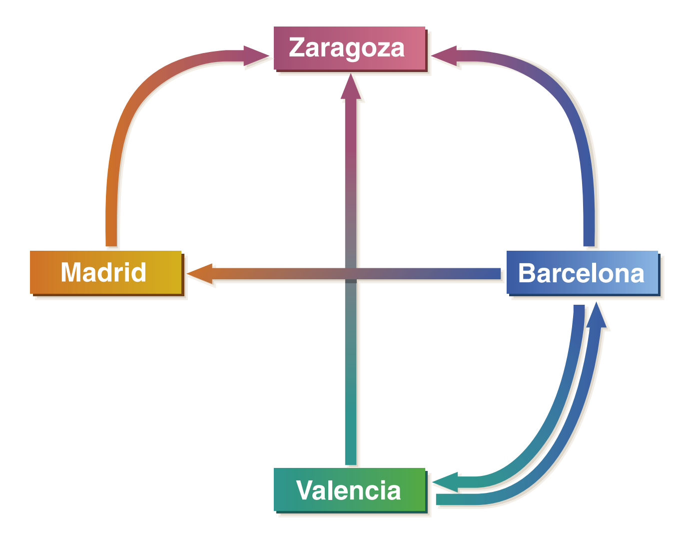
El problema del camino hamiltoniano

Imaginemos un mapa de ciudades conectadas por vuelo directo (*a la derecha, arriba*). En el caso ilustrado se va directamente desde Barcelona hasta Zaragoza, pero no en sentido contrario. Se trata de determinar si existe un camino que parta de una ciudad inicial (Valencia), concluya en la ciudad final (Zaragoza) y visite exactamente una vez cada una de las ciudades restantes. En la computación con ADN, a cada ciudad se le asigna una secuencia de ADN (*ACTTGCAG*, en el caso de Valencia), que se puede imaginar compuesta por un nombre (*ACTT*) seguido de un apellido (*GCAG*). Los números de vuelo en ADN pueden ser definidos después por concatenación del apellido de la ciudad de origen con el nombre de la ciudad de destino (*a la derecha, abajo*).



Los nombres complementarios en ADN de las ciudades son la secuencia complementaria de sus correspondientes nombres en ADN, en los cuales cada *C* es reemplazada por una *G*, cada *G* por una *C*, cada *A* por una *T*, y cada *T* por una *A*. (Para simplificar la exposición en nuestro caso, se han suprimido los detalles de las terminaciones 3' y 5' de las moléculas de ADN.) En el caso de este problema concreto, existe sólo un camino hamiltoniano, que pasa por Valencia, Barcelona, Madrid y Zaragoza, en ese orden. En la computación, el camino está representado por *GCAGTCGGACTGGGCTATGTCCGA*, una secuencia de ADN de longitud 24. Podemos ver a la izquierda el mapa con siete ciudades y 14 vuelos directos utilizados en el experimento real.

—*L.M.A.*



CIUDAD	NOMBRE EN ADN	COMPLEMENTO
VALENCIA	ACTTGCAG	TGAACGTC
BARCELONA	TCGGACTG	AGCCTGAC
MADRID	GGCTATGT	CCGATACA
ZARAGOZA	CCGAGCAA	GGCTCGTT

VUELO	NUMERO DE VUELO EN ADN
VALENCIA - BARCELONA	GCAGTCGG
VALENCIA - ZARAGOZA	GCAGCCGA
BARCELONA - MADRID	ACTGGGCT
BARCELONA - ZARAGOZA	ACTGCCGA
BARCELONA - VALENCIA	ACTGACTT
MADRID - ZARAGOZA	ATGTCCGA

dauer, de IBM [*véase* "Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1985, págs. 30-39]. Pero, aunque se conocía una enzima (la ADN polimerasa) capaz de efectuar la complementación Watson-Crick, se suponía imposible la existencia de otras enzimas capaces de realizar funciones de interés matemático, como la descomposición factorial de números.

Lo cual nos lleva a una confesión. Los biotecnólogos somos una comunidad de ladrones. Robamos de la célula. Estamos muy lejos de poder crear *ex novo* máquinas moleculares milagrosas, como la ADN polimerasa. Por fortuna, tres o cuatro mil millones de años de evolución han producido células repletas de máquinas diminutas y maravillosas. Son estas máquinas, incautadas a la célula, las que hacen posible la biotecnología moderna. Pero, que se sepa, la evolución no ha creado una máquina molecular que juegue

DE VALENCIA A BARCELONA
DE BARCELONA A MADRID
DE MADRID A ZARAGOZA
COMPLEMENTO DE BARCELONA
COMPLEMENTO DE MADRID

2. EMPAREJAMIENTO WATSON-CRICK, en el que las *C* forman pares con las *G* y las *A* con las *T*. Producirá hebras de ADN con números de vuelo (aquí se muestran: de Valencia a Barcelona, de Barcelona a Madrid, y de Madrid a Zaragoza) mantenidas extremo contra extremo mediante hebras que codifican los nombres complementarios de las ciudades (aquí vemos: Barcelona y Madrid).

al ajedrez. Por tanto, si pretendiera construir una computadora de ADN capaz de algo que encerrara valor en computación, tendría que recurrir a los instrumentos disponibles. Este instrumental consta, en esencia, de lo siguiente:

1. Emparejamiento Watson-Crick. Cada hebra de ADN tiene su complemento Watson-Crick. Ocurre que si, en una disolución, una molécula de ADN tropieza con su complementaria, las dos hebras se imbrican, vale decir, las dos hebras se enroscan una alrededor de la otra en la célebre doble hélice. Las hebras no están ligadas por enlaces covalentes, sino por puentes de hidrógeno, unas fuerzas débiles. Cuando una molécula de ADN de la disolución se topa con una molécula de ADN que no es complementaria suya (ni posee largas secuencias de complementariedad), las moléculas no se imbrican.

2. Polimerasas. Las polimerasas copian información de una molécula en otra. Por ejemplo, la ADN polimerasa construirá una hebra de ADN, complementaria Watson-Crick, a partir de un molde de ADN. La enzima requiere, cierto, una "señal de arranque" que le diga dónde ha de empezar a realizar la copia complementaria. Un cebador aporta la señal; iniciador que consiste en un fragmento (posiblemente corto) de ADN enroscado al molde por complementariedad Watson-Crick. Cada vez que se encuentra una pareja cebador-molde, la polimerasa empieza a añadir bases al cebador, y va creando una copia complementaria del molde.

3. Ligasas. Las ligasas unen moléculas entre sí. Por ejemplo, la ADN ligasa toma dos hebras de ADN que se encuentran próximas y las une mediante enlaces covalentes, formando una sola hebra. Con la ADN ligasa la célula restaña las hebras rotas por culpa, entre otros motivos, de una exposición a luz ultravioleta.

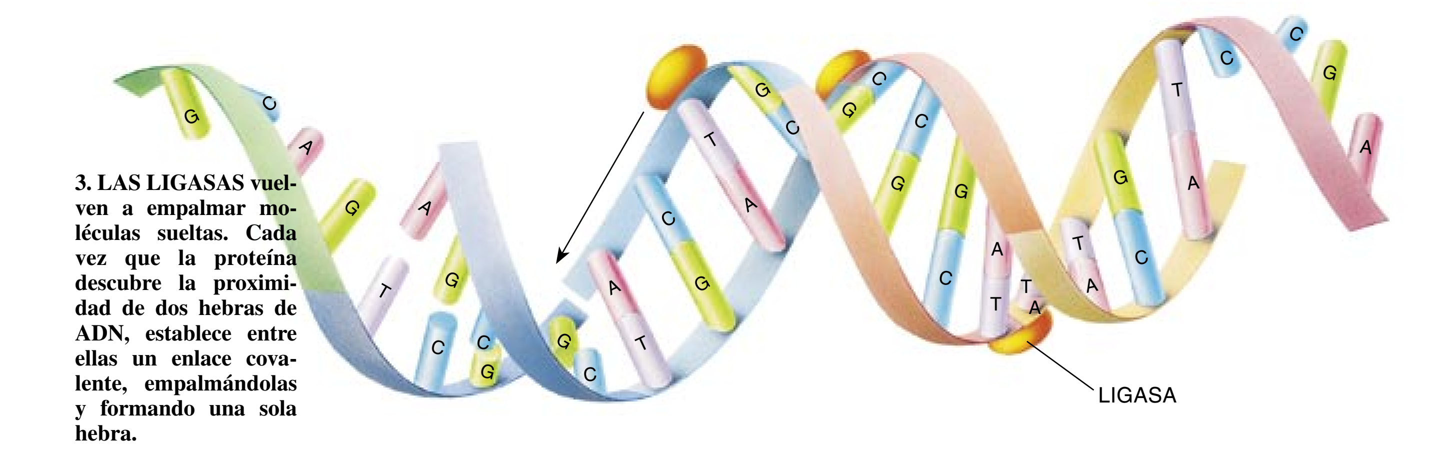
4. Nucleasas. Las nucleasas seccionan los ácidos nucleicos. En ese orden, las endonucleasas de restricción "exploran" las hebras de ADN en busca de una secuencia determinada de bases; hallada, seccionan la molécula por ese punto, dividiéndola en dos piezas. Una enzima de restricción es EcoRI (de *Escherischia coli*), que secciona la molécula tras la *G* de la secuencia *GAATTC*; casi nunca tajará una hebra de ADN por otro sitio. Se ha sugerido que las enzimas de restricción evolucionaron para defender de los virus a las bacterias. Así *E. coli* cuenta con un medio (la metilación) de proteger a su propio ADN de la EcoRI, pero un virus invasor que contuviera la secuencia letal *GAATTC* quedaría hecho trizas. Aunque mi computadora de ADN no utilizó enzimas de restricción, éstas sí se emplearon en experimentos posteriores.

5. Electroforesis en gel. No le hemos quitado a la célula este ingenio. En un extremo de una lámina gruesa de gel se dispone una disolución de moléculas heterogéneas de ADN; se aplica una corriente eléctrica. Las moléculas de ADN, dotadas de carga negativa, se mueven hacia el polo positivo, o ánodo; las hebras cortas cursan más rápidas que las largas. El proceso separa, pues, el ADN de acuerdo con su longitud. Para observar el patrón de bandas formado en el gel con las moléculas de ADN de diversa longitud nos valemos de reactivos químicos especiales y luz ultravioleta.

6. Síntesis de ADN. Podemos ya escribir una secuencia de ADN en un papel, enviar la nota a un servicio de síntesis y recibir días más tarde un tubo de ensayo que contiene aproximadamente 10^{18} moléculas de ADN, todas las cuales (o la mayoría, cuando menos) tienen la secuencia descrita. Podemos ahora manipular secuencias de longitud aproximada 100. Las moléculas se entregan deshidratadas, en un tubito, y ofrecen el aspecto de un montoncito blanco y amorfo.

No parecía probable que ninguno de esos ingenios sirviera para jugar al ajedrez. Pero no se debe olvidar otro hecho importante que los lógicos de los años treinta nos han enseñado: la computación es sencilla. Para construir una computadora bastan un método para almacenar información y unas cuantas operaciones simples para actuar sobre ella. La máquina de Turing almacena información en forma de secuencias de letras escritas sobre una cinta y manipula esa información mediante las instrucciones contenidas en el control finito. Un ordenador electrónico almacena información en forma de secuencias de ceros y unos, y manipula esa información mediante las operaciones disponibles en los microcircuitos de su procesador. Merece destacarse que prácticamente cualquier método de almacenar información y cualquier conjunto de operaciones para actuar sobre tal información resultan adecuados.

¿Adecuados para qué? Para la computación universal, para el cómputo de cualquier cosa susceptible de computarse. Para hacer que nuestro ordenador realice complementos Watson-Crick, o juegue al ajedrez, sólo se necesita comenzar con la información de entrada correcta, y aplicar la secuencia debida de operaciones, es decir, la ejecución de un programa. El ADN constituye una forma magnífica de almacenar información. De hecho, la célula ha estado



3. LAS LIGASAS vuelven a empalmar moléculas sueltas. Cada vez que la proteína descubre la proximidad de dos hebras de ADN, establece entre ellas un enlace covalente, empalmándolas y formando una sola hebra.

utilizando este método para almacenar las "instrucciones de la vida" durante miles de millones de años. Además, las enzimas, como las polimerasas y las ligasas, han servido para operar sobre esta información. ¿Había elementos suficientes para construir una computadora universal? A la vista de las lecciones impartidas en los años treinta, estaba seguro de que la respuesta era afirmativa.

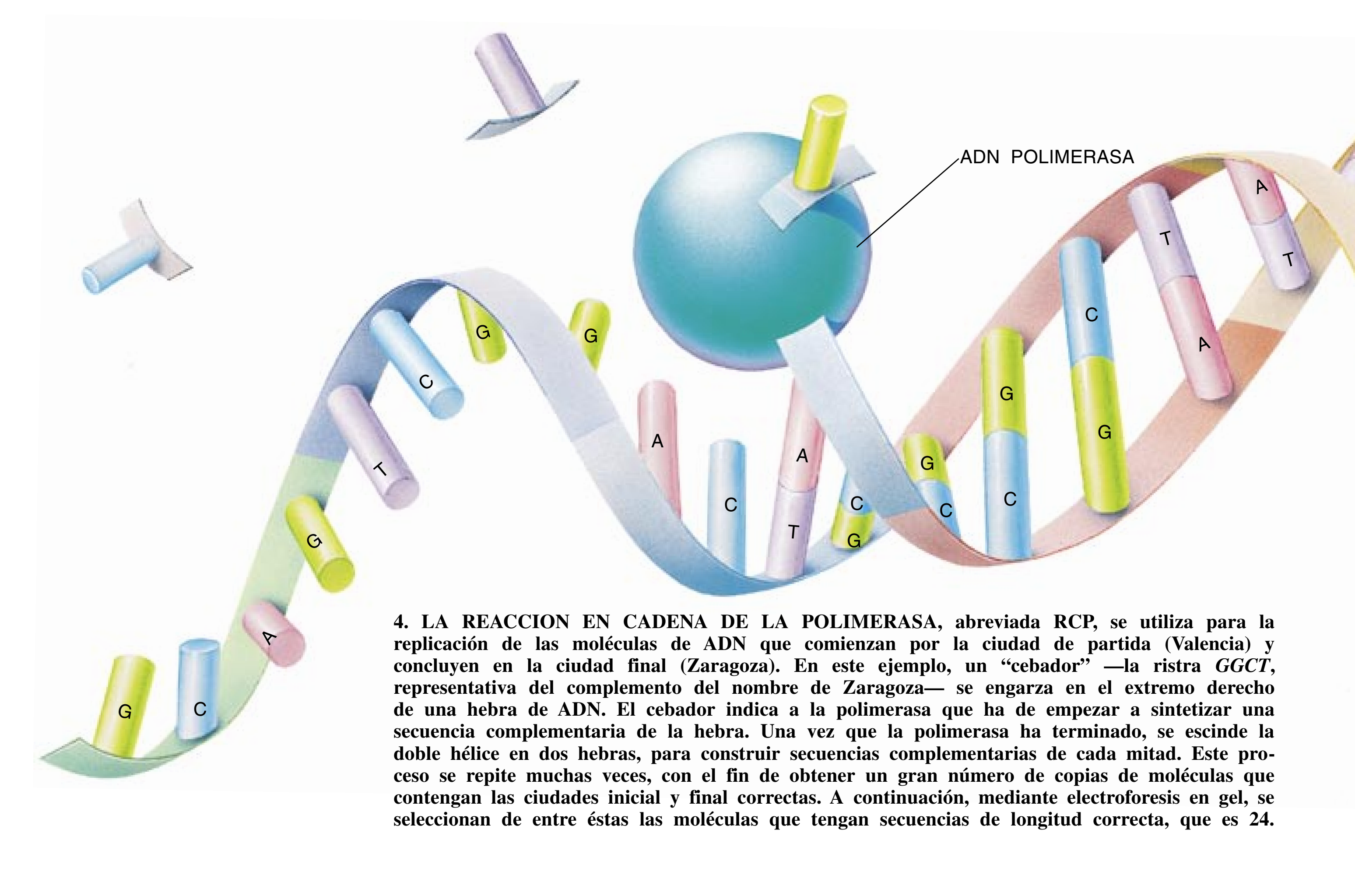
La tarea siguiente consistía en seleccionar un problema que resolver. El problema no debería parecer preparado a la medida de la máquina, para que ésta pudiera resolverlo; sí debería, en cambio, poner de manifiesto las posibilidades que abre el nuevo método de computación. Opté por el problema del camino hamiltoniano.

William Rowan Hamilton fue astrónomo real de Irlanda a mediados del siglo XIX. El problema que hoy lleva su nombre lo hemos ilustrado en un recuadro particular, al que nos referiremos de continuo. Representemos por flechas (lados orientados) los vuelos directos entre las ciudades (vértices) del mapa (grafo). Por ejemplo, se puede volar sin escalas de Barcelona a Madrid, pero no de Madrid a Barcelona. La tarea (el problema del camino hamiltoniano) consiste en determinar si existe una secuencia de vuelos consecutivos (un camino) que parta de Valencia (vértice inicial), acabe en Zaragoza (el vértice final) y visite cada una de las demás ciudades (Barcelona y Madrid) exactamente una vez. Un itinerario así se denomina camino hamiltoniano. En el ejemplo presentado en el recuadro resulta fácil ver que existe sólo un camino hamiltoniano, la ruta que recorre las ciudades en este orden: Valencia, Barcelona, Madrid, Zaragoza. Si cambiamos el orden, y exigimos que sea Zaragoza el punto de partida, y Valencia el final de trayecto, es evidente que no existirá ningún camino hamiltoniano.

Con mayor generalidad, dado un grafo con lados orientados y vértices inicial y final especificados, se dice que existe un camino hamiltoniano si y solamente si existe un camino que parte del vértice inicialmente fijado, concluye en el vértice final y visita cada vértice una sola vez. El problema del camino hamiltoniano consiste en decidir si, para un grafo cualquiera, con vértices inicial y final especificados, existe o no un camino hamiltoniano.

El problema del camino hamiltoniano ha sido objeto de profundo estudio en informática. No se ha descubierto ningún algoritmo eficiente (es decir, rápido) para resolverlo. Antes bien, parece verosímil la existencia de grafos de menos de 100 vértices, para los cuales la determinación de la existencia o inexistencia de caminos hamiltonianos exigiría cientos de años, incluso utilizando los mejores ordenadores y algoritmos disponibles.

En los primeros años setenta se demostró que el problema del camino hamiltoniano era "NP-completo". Sin entrar en la teoría de NP-completitud, baste decir que este descubrimiento convenció a la mayoría de los teóricos de que no es posible en absoluto ningún algoritmo eficiente para el problema (aunque la demostración de este hecho sigue siendo el problema abierto más importante de las ciencias de cómputo, el problema denominado "¿NP = P?" [véase "Máquinas de Turing," por John E. Hopcroft;



4. LA REACCION EN CADENA DE LA POLIMERASA, abreviada RCP, se utiliza para la replicación de las moléculas de ADN que comienzan por la ciudad de partida (Valencia) y concluyen en la ciudad final (Zaragoza). En este ejemplo, un "cebador" —la ristra *GGCT*, representativa del complemento del nombre de Zaragoza— se engarza en el extremo derecho de una hebra de ADN. El cebador indica a la polimerasa que ha de empezar a sintetizar una secuencia complementaria de la hebra. Una vez que la polimerasa ha terminado, se escinde la doble hélice en dos hebras, para construir secuencias complementarias de cada mitad. Este proceso se repite muchas veces, con el fin de obtener un gran número de copias de moléculas que contengan las ciudades inicial y final correctas. A continuación, mediante electroforesis en gel, se seleccionan de entre éstas las moléculas que tengan secuencias de longitud correcta, que es 24.

en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984]. No se está diciendo que no existan algoritmos para el problema del camino hamiltoniano, sino sólo que no los hay eficientes. Consideremos el algoritmo siguiente:

Dado un gráfico con *n* vértices,

1. Genérese un conjunto de caminos aleatorios que atraviesen el grafo.
2. Para cada camino del conjunto:
   a. Compruébese si el camino parte del vértice inicial y acaba en el vértice final. Si no es así, elimínese el camino del conjunto.
   b. Compruébese si el camino visita exactamente *n* vértices. Si no es así, elimínese el camino del conjunto.
   c. Para cada vértice, compruébese si ese camino pasa por el vértice. De no ser así, elimínese el camino del conjunto.
3. Si el conjunto no es vacío, se informa que existe un camino hamiltoniano. Si el conjunto es vacío, se informa que no existe camino hamiltoniano.

No se trata de un algoritmo perfecto. Pero si la generación de caminos es lo suficientemente aleatoria, y el conjunto generado bastante grande, el algoritmo presenta grandes probabilidades de suministrar la respuesta correcta. Este es el algoritmo que he implantado en el primer cómputo por ADN.

Busqué para mi experimento un problema de camino hamiltoniano pequeño, que admitiera una solución rápida en el laboratorio, aunque lo bastante grande para proporcionar una clara "demostración de posibilidades" de la computación con ADN. Seleccioné el mapa de 7 ciudades y 14 vuelos del inserto del recuadro. Un estudio no científico ha puesto de manifiesto que, por término medio, hacen falta unos 54 segundos para hallar el único camino hamiltoniano que admite este grafo. (Los lectores pueden empezar ya...)

Para simplificar aquí la exposición, nos fijaremos en el mapa del recuadro, que contiene sólo cuatro ciudades, Valencia, Barcelona, Madrid y Zaragoza, conectadas por seis vuelos. El problema consiste en determinar la existencia de un camino hamiltoniano que parta de Valencia y concluya en Zaragoza.

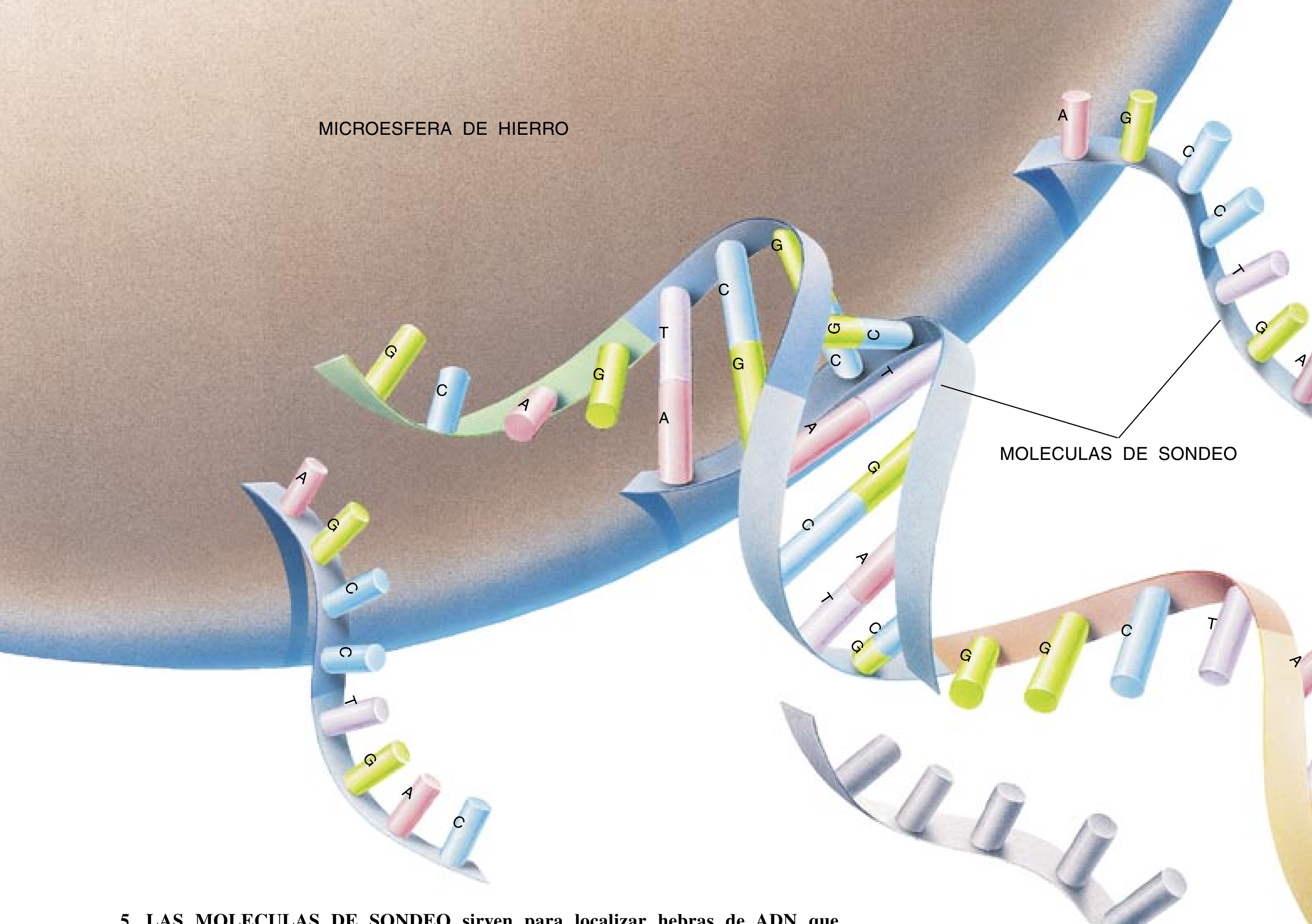
Empecé asignando a cada ciudad una secuencia arbitraria de ADN. En nuestro ejemplo, Valencia se convierte en *ACTTGCAG*, Barcelona en *TCGGACTG*, y así las demás. Resulta conveniente imaginar que la primera mitad de la secuencia de ADN es el nombre de pila de la ciudad, y la segunda, el apellido. Así pues, el apellido de Valencia es *GCAG*, mientras que el nombre de Barcelona es *TCGG*. A continuación, le asigné a cada vuelo directo un "número de vuelo" en ADN, obtenido por concatenación del apellido de la ciudad de origen con el nombre de la ciudad de destino. En el ejemplo del recuadro ilustrado, el número del vuelo de Valencia a Barcelona se convierte en *GCAGTCGG*.

Recordemos que cada hebra de ADN tiene su complemento Watson-Crick. Así pues, cada ciudad tiene su nombre ADN complementario. El nombre complementario de Valencia, por ejemplo, es *TGAACGTC*.

Tras elaborar estas codificaciones, tuve sintetizados los nombres complementarios en ADN de las ciudades y los de los números de vuelo. (Se vio más adelante que sobraban los nombres en ADN de las ciudades.) Tomé una pizca (unas 10^{14} moléculas) de cada una de las distintas secuencias; las introduje en un mismo tubo de ensayo. Para empezar el cómputo, me limité a añadir agua, así como ligasa, sal y otros pocos ingredientes, con que remedar las condiciones del interior de una célula. En total, la disolución utilizada sería del orden de una cincuentava parte de una cucharadita. En cosa de un segundo, tenía en mi mano la solución al problema del camino hamiltoniano.







5. LAS MOLECULAS DE SONDEO sirven para localizar hebras de ADN que codifiquen caminos que pasen por las ciudades intermedias (Barcelona y Madrid). A tal fin, se ligan moléculas sonda que contengan el complemento del nombre en ADN de Barcelona (*AGCCTGAC*) a una microesfera de hierro en suspensión dentro del líquido. Por la afinidad Watson-Crick, las sondas capturan hebras de ADN que contienen el nombre de Barcelona (*TCGGACTG*). Acto seguido, se procede a eliminar las hebras de ADN que no contengan el nombre de Barcelona. El proceso se repite con moléculas sonda que codifiquen el complementario del nombre en ADN de Madrid. Una vez efectuados todos los pasos computacionales, las hebras restantes serán los que codifiquen la solución *GCAGTCGGACTGGGCTATGTCCGA*.

Para comprobarlo, consideremos lo que transpira en el tubo. Por ejemplo, el vuelo de Valencia a Barcelona, que tiene un "número ADN" (*GCAGTCGG*), y el nombre complementario de Barcelona (*AGCCTGAC*) podrían encontrarse por azar. Por diseño, la primera secuencia acaba con *TCGG*, mientras que la segunda empieza por *AGCC*. Dado que estas dos secuencias son complementarias, se adherirán una a otra. Si el complejo resultante se encuentra ahora con el número de vuelo de Barcelona a Madrid (*ACTGGGCT*), éste, también, se unirá al complejo, porque el final del primero (*TGAC*) es complementario del comienzo del segundo (*ACTG*). Los complejos, de este modo, irán aumentando de longitud, siendo sucesivamente "entabillados" los números de vuelo por los nombres en ADN, complementarios, de las ciudades. Después, la ligasa de la mezcla engarzará de forma permanente las cadenas de los números de vuelo en ADN. Por tanto, el tubo de ensayo contiene moléculas que codifican sendas aleatorias que visitan las distintas ciudades (como exigía el primer paso del algoritmo).

Puesto que empecé con tan gran número de moléculas de ADN, y dado que el problema solamente contenía un puñado de ciudades, podía tener la seguridad de que al menos una de las moléculas formadas sería la codificación del camino hamiltoniano. Estremecía el pensar que la solución de un problema matemático pudiera quedar almacenada en una molécula.

Fijémonos también en que todos los caminos fueron creados de una vez, por interacciones simultáneas de cientos de billones de moléculas. Esta reacción bioquímica equivale a un enorme procesamiento en paralelo.

En el caso del mapa del recuadro ilustrado no hay más que un camino hamiltoniano, el que pasa por Valencia, Barcelona, Madrid y Zaragoza, en ese orden. Por tanto, la molécula que codifique la solución tendrá la secuencia *GCAGTCGGACTGGGCTATGTCCGA*.

Por desgracia, aunque tenía la solución en la mano, había también otros 100 billones de moléculas que codificaban caminos no hamiltonianos. Era preciso eliminarlas. Para expurgar las moléculas que no empezaban en la ciudad de partida ni concluían en el destino final, me basé en la reacción en cadena de la polimerasa (RCP).

Esta técnica exige muchas copias de dos breves tramos de ADN que sirvan de cebadores, que indiquen a la ADN polimerasa dónde ha de empezar su replicación Watson-Crick. Los cebadores utilizados fueron el apellido de la ciudad de partida (*GCAG* para Valencia) y el complemento Watson-Crick del primer nombre de la ciudad final (*GGCT* para Zaragoza). Los dos cebadores actuaban concertadamente. El primero alertaba a la ADN polimerasa para que copiase complementos de secuencia que tuvieran la ciudad de partida correcta; el segundo iniciaba la duplicación de moléculas que codificaran la ciudad final correcta.

La RCP cursa mediante ciclos térmicos, consistentes en repetidas elevaciones y descensos de la temperatura de la mezcla contenida en el tubo de ensayo. Las temperaturas moderadas promueven que la ADN polimerasa empiece la replicación; las temperaturas más elevadas provocan que las hebras encastadas resultantes se escindan de su estructura en doble hélice, lo que permite la replicación subsiguiente de las piezas individuales.



Con ello las moléculas que tuvieran las ciudades iniciales y finales correctas se reprodujeron a una tasa exponencial. En comparación, las moléculas que tenían ciudad inicial correcta, pero una ciudad terminal incorrecta, o viceversa, se duplicaron con una tasa lineal, mucho más lenta. Las secuencias de ADN sin principio ni final correctos permanecieron sin replicarse. Así pues, una vez completa la RCP, tomando una pequeña cantidad de la mezcla, se obtenía una disolución donde había muchas copias de las moléculas con las ciudades inicial y final correctas, y pocas, o ninguna, que no cumplieran este criterio. Quedaba así efectuado el paso 2a del algoritmo.

Recurrí luego a la electroforesis en gel para identificar las moléculas que alcanzaban la longitud correcta (en el ejemplo del recuadro ilustrado, una longitud de 24). Se desecharon las demás moléculas. Con ello se concluía el paso 2b del algoritmo.

Para comprobar si los itinerarios de las secuencias restantes pasaban todas por las ciudades intermedias, me apoyé en la separación por afinidad, proceso que utiliza múltiples copias de una "sonda" de ADN que codifica el nombre complementario de una ciudad (por ejemplo, Barcelona). Estas sondas van prendidas de bolitas microscópicas de hierro, de un micrometro de diámetro.

Suspendí las bolas en el tubo que contenía las moléculas restantes en condiciones que favorecían el emparejamiento Watson-Crick. Sólo las moléculas que incluyeran el nombre de la ciudad deseada (Barcelona) se trabarían con las sondas. Coloqué después un imán al costado del tubo de ensayo, para atraer y mantener las bolitas férricas adheridas a la pared del tubo, mientras vertía fuera la fase líquida cuyas moléculas no contenían el nombre de la ciudad deseada.

Añadí después nuevo disolvente y retiré el imán, para que las esferitas de hierro volvieran a quedar en suspensión. Elevando la temperatura de la mezcla, las moléculas se desprendían de las sondas, para disolverse de nuevo en el líquido. Volví a aplicar el imán para atraer las esferitas hacia las paredes del tubo, pero ahora las esferitas no llevaban adheridas moléculas. El líquido, que contenía las hebras de ADN deseadas (en el ejemplo, las que determinan rutas que pasan por Barcelona), podía ser vertido en un nuevo tubo para ulterior separación. El proceso fue repetido para las ciudades intermedias restantes (Madrid, en este caso). Este proceso iterativo, que me llevó todo un día cuando lo realicé en mi laboratorio, fue la parte más tediosa del experimento.

Con las separaciones de afinidad terminó el paso 2c del algoritmo. Sabía yo que las moléculas que quedasen en el tubo serían precisamente las que codificasen los caminos de Hamilton. Por tanto, si el tubo contenía todavía algo de ADN, se podía concluir que existía en el grafo un camino hamiltoniano; la inexistencia de ADN indicaría que no existía dicho camino. Por suerte, para realizar esta determinación podía aplicar un paso de RCP más, seguida por otra operación de electroforesis en gel. Los análisis finales revelaron que las moléculas subsistentes realmente codificaban el camino de Hamilton deseado. Tras siete días de laboratorio, se había llevado a cabo el primer cómputo realizado con ADN.

¿Qué ocurrirá en el futuro? Las computadoras moleculares encierran muchas propiedades atractivas. Proporcionan un almacenamiento de información de una densidad excepcional. Por ejemplo, un gramo de ADN, que ocupa, en seco, alrededor de un centímetro cúbico, puede almacenar aproximadamente la información de un billón de discos compactos. Aportan un enorme paralelismo. Incluso en el diminuto experimento realizado en un cincuentavo de cucharadita de disolución, alrededor de unos 10^{14} números de vuelo, codificados en ADN, quedaron simultáneamente concatenados en cosa de un segundo. No está claro si el más veloz de los superordenadores disponibles podría realizar tan rápidamente una tarea semejante.

Las computadoras moleculares ofrecen, además, la posibilidad de alcanzar el máximo rendimiento desde el punto de vista energético. En principio, bastaría un joule para realizar unas 2×10^{19} operaciones de ligadura. Se trata de un resultado muy notable, habida cuenta de que la segunda ley de la termodinámica dicta un máximo de 34×10^{19} operaciones (irreversibles) por joule (a temperatura ambiente). Las supercomputadoras existentes son, en punto a energía, mucho menos eficientes, pues ejecutan a lo sumo unas 10^9 operaciones por joule.

En muchos departamentos y laboratorios se trabaja para sacar partido de estas propiedades. ¿Tendrán éxito en la creación de computadoras moleculares capaces de competir con los ordenadores electrónicos? Es cosa por ver. Durante medio siglo, enormes inversiones financieras e intelectuales han convertido a los ordenadores electrónicos en las maravillas de nuestra era. Serán difíciles de vencer.

Pero seríamos muy miopes si considerásemos esta investigación sólo desde el punto de vista práctico. Mi experimento puede verse como

una manifestación de un área nueva de la ciencia, que es posible gracias a nuestra capacidad, rápidamente creciente, para controlar el mundo molecular. Podemos hallar en muchos lugares pruebas de esta nueva "ciencia molecular". Sin ir más lejos, Gerald F. Joyce, del Instituto Scripps de Investigación en La Jolla, "cría" billones de moléculas de ARN, generación tras generación, hasta que evolucionan moléculas "campeonas" que poseen las propiedades catalíticas que él busca [*véase* "Evolución molecular dirigida", por Gerald F. Joyce, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1993]. Julius Rebek, Jr., del Instituto de Tecnología de Massachusetts, crea moléculas capaces de reproducirse, lo que nos informa de cómo pudo haber surgido la vida en la Tierra [*véase* "Moléculas sintéticas autorreplicantes", por Julius Rebek, Jr., en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1994]. Estimulado por la investigación en computación con ADN, Erik Winfree, del Instituto de Tecnología de California, sintetiza complejos moleculares "inteligentes" que se pueden programar para que se ensamblen a sí mismos según estructuras predeterminadas y de complejidad arbitraria. Hay muchos otros ejemplos. Debemos centrar nuestra atención en la enormes posibilidades que este campo ofrece y en cultivarlas.

Por lo que a mí concierne, me basta saber que la computación con ADN es posible. A lo largo del último medio siglo han florecido la biología y las ciencias de cómputo, las cuales, no cabe duda, ocuparán un lugar central en nuestro progreso científico y económico en el nuevo milenio. Pero la biología y las ciencias de cómputo —la vida y la informática— están relacionadas. Tengo fe en que en su interfase esperan grandes hallazgos a quienes allí acudan.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOLECULAR COMPUTATION OF SOLUTIONS TO COMBINATORIAL PROBLEMS. Leonard M. Adleman, en *Science*, vol. 266, págs. 1021-1024; 11 de noviembre de 1994.

ON THE PATH TO COMPUTATION WITH DNA. David K. Gifford en *Science*, vol. 266, págs. 993-994, 11 de noviembre de 1994.

DNA SOLUTION OF HARD COMPUTATIONAL PROBLEMS. Richard J. Lipton en *Science*, vol. 268, págs. 542-545; 28 de abril de 1995.

Tim Beardsley

J. CRAIG VENTER: ¿Una vía rápida hacia el genoma?

J. Craig Venter, voluble director del Instituto para la Investigación Genómica (TIGR) de Rockville (Maryland), anda muy solicitado estos días. Promotor incansable de sus ideas, Venter sacudió el mundo de la genética humana en mayo, cuando anunció (desde la primera página del *New York Times*) que se proponía determinar en tres años, y con financiación privada, la secuencia entera del genoma humano, es decir, de las unidades químicas que componen su ADN. Semejante declaración provocó la reacción de los científicos involucrados en el Proyecto Genoma Humano, empeño internacional que comenzó en 1990 con la esperanza de obtener antes del 2005 la secuencia completa. Este proyecto, además de público, decuplica los costes del plan de Venter. Pero el historial profesional de éste obliga a tomarse en serio su propuesta.

En 1995 nuestro hombre dejó mudos a sus colegas al publicar la primera secuencia completa del ADN de un organismo vivo, el de la bacteria *Haemophilus influenzae*, agente de la meningitis y sordera. Lo consiguió gracias a la clonación aleatoria del genoma completo. Esa técnica, novedosa entonces, puso en cuestión los esquemas mentales al uso. Según declara, "se tocaba con las manos lo que era obtener el 100 por cien de cada gen. Va a ser el futuro de la biología y de la medicina y de nuestra especie". Durante los dos años y medio siguientes, obtuvo las secuencias parciales o completas del ADN de varios microorganismos más: entre otros, los causantes de la enfermedad de Lyme, de las úlceras de estómago y de la malaria.

La compañía que acometerá esta iniciativa privada para obtener el genoma humano todavía no tiene nombre. Será propiedad de TIGR, de la empresa Perkin-Elmer (el principal fabricante de secuencias de ADN) y del mismo Venter, que la presidirá. Este piensa entrenarse para la secuenciación humana desentrañando el genoma de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*, el organismo clásico de la investigación genética.

A sus 51 años, Venter puede presumir de una vida ajetreada. Siendo funcionario del Instituto Nacional de la Salud (NIH) a principios de los noventa, se vio envuelto en una disputa en torno a un intento fallido por patentar cientos de secuencias genéticas humanas parciales. Venter había descubierto las secuencias parciales, a las que denominó porciones de secuencia que se expresan (EST), con una técnica que había desarrollado en su laboratorio del NIH para identificar genes activos en ADN enrevesado. "Comprendí que cualquiera de nuestras células realiza mejor esa tarea que el superordenador más refinado", afirma Venter.



Por delante del pelotón: J. Craig Venter posa con un modelo de su yate de carreras

Muchos expertos, incluido el entonces director del programa del genoma humano del NIH, James D. Watson, se opusieron a la idea de patentar las EST, argumentando que se pondría en peligro la cooperación entre los investigadores. En una exposición ante el Congreso, Watson describió memorablemente la técnica automática de caza de genes propuesta por Venter diciendo que podría "ser realizada por los monos". Más tarde, un colega de Venter del NIH le devolvió el guante enfundándose en un disfraz de mono.

Venter abandonó el NIH en 1992, al sentirse minusvalorado. No esconde su irritación ante la tardanza de sus colegas en reconocer su propuesta para secuenciar *H. influenzae*. El NIH no le concedió fondos para su proyecto. Tras rechazar varias invitaciones tentadoras para dirigir empresas de biotecnología, aceptó una subvención de 70 millones de dólares de la HealthCare Investment Corporation para instalar el TIGR, donde continuó su trabajo de secuenciación. Ahora, cuando no sueña con audaces proyectos de investigación, Venter descansa navegando en alta mar con su yate.

Para descerrajar el genoma humano se servirá de la técnica de clonación aleatoria, aplicada ya en los casos de *H. influenzae* y otros microorganismos. El método pone en evidencia la exasperante lentitud del Proyecto Genoma Humano. Hasta la fecha, este programa ha dedicado la mayoría de sus recursos a la "cartografía" del genoma (esto es, a definir mojones moleculares que permitirán ensamblar la secuencia). Pero la clonación aleatoria del genoma completo no emplea la cartografía; antes bien, se rompe el genoma en millones

de fragmentos que se solapan al azar, y se determina entonces parte de la secuencia de nucleótidos de cada fragmento. Por último, entran ordenadores potentes que encajan las piezas para reconstruir, a partir de la maraña de datos, la secuencia del genoma.

Según era de prever, la jugada de Venter provocó que algunos miembros del Congreso cuestionaran la oportunidad de aportar fondos públicos al programa del genoma cuando el trabajo podía llevarse a cabo con fondos privados. Pero si la meta del Proyecto Genoma Humano es elaborar una secuencia completa y fiable de todo el ADN humano, dice Francis S. Collins, director de la sección estadounidense del proyecto, entonces las técnicas de Venter no pueden por sí solas cumplir este requisito. Los investigadores insisten en que esa manera de "picotear" suministrará una información que contendrá miles de agujeros y de errores, aunque a corto plazo funcione. Venter acepta que habrá deficiencias, pero espera conseguir una exactitud del 99,99 por ciento.

Poco después de que la propuesta de Venter saltara a los titulares, los investigadores que trabajaban con financiación pública comenzaron a meditar un plan para acelerar su propio calendario de trabajo con vistas a presentar un "primer borrador" del genoma humano antes de lo previsto. Collins sostiene que esta propuesta hubiera salido a la luz incluso sin la proclama de Venter.

Siempre fue un poco iconoclasta. Apenas aprobó el bachillerato en los años sesenta, se dedicó al "surfing" hasta que le llamaron a filas. Las expectativas de entrenarse para los Juegos Olímpicos con el equipo de natación de la Marina se esfumaron cuando el presidente Lyndon B. Johnson intensificó las hostilidades en Vietnam. Pero Venter dice que sacó las mejores calificaciones entre 35.000 compañeros de la Marina en una prueba de inteligencia, lo que le permitió dedicarse a su vocación, la medicina. Durante cinco días con sus noches, sin pausas, dispensó primeros auxilios a los heridos en uno de los hospitales de Da Nang durante la ofensiva Tet; trabajó también en un orfanato vietnamita.

Conocer tan próxima la muerte estéril e inocente le movió a interesarse por el Tercer Mundo. Entonces, durante el curso preparatorio para el ingreso en la Universidad de California en San Diego, le entró el gusanillo de la investigación y empezó bioquímica. Conoció a su mujer, Claire M. Fraser, ahora del consejo de administración de TIGR, durante una estancia en el Instituto Oncológico Roswell Park de Buffalo (Nueva York) y se llevó su grupo de investigación al NIH en 1984.

Los esfuerzos por aislar y secuenciar los genes que cifran los receptores, proteínas del cerebro, aceleraron el paso tras ofrecer su atestado laboratorio como primer lugar de pruebas para un secuenciador automático de ADN fabricado por Applied Biosystems International, ahora una división de Perkin-Elmer. Hasta entonces, sólo había logrado secuenciar un gen receptor, tras más de un decenio de trabajo. Sentía que debía proceder "de manera mucho más inteligente" que los científicos que disponían de grandes laboratorios. Venter pronto pasó a utilizar secuenciadores automáticos para encontrar más genes; luego se puso a ponderar los protocolos del Proyecto Genoma Humano, en fase de debate entonces.

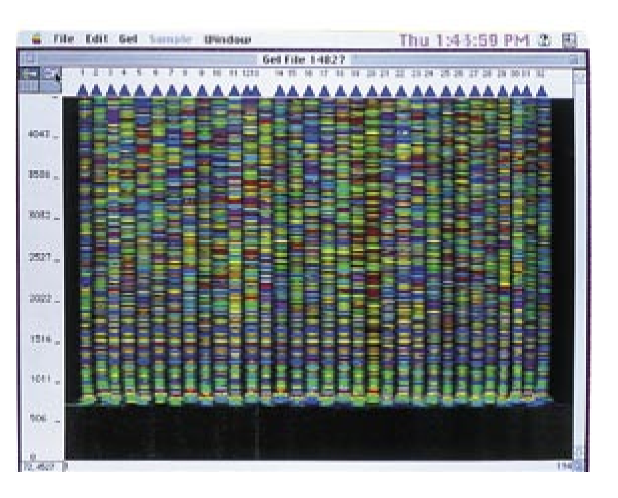
Tras dejar la administración y trasladarse al TIGR, Venter comenzó una controvertida colaboración con Human Genome Sciences, una compañía de biotecnología de Rockville que se proponía explotar las EST para encontrar genes. La relación, nunca fácil, se fue al garete el año pasado. Según Venter, William A. Haseltine, director general de la compañía, cada vez ponía más reparos para dejarle publicar rápidamente sus datos. A lo que Haseltine responde que él renunciaba frecuentemente a los plazos que podría haber exigido.

El divorcio de Human Genome Sciences le costó a TIGR 58 millones de dólares en depósitos de garantías. Sin embargo, al día siguiente de anunciarse la ruptura TIGR comenzó a rehabilitarse frente a la reticente comunidad científica insertando en su página de la Red datos sobre miles de secuencias genéticas de bacterias.

El edificio donde se realizará la secuenciación para la nueva compañía del genoma humano de Venter, que se está construyendo junto al TIGR, será el último grito de la técnica. Producirá más datos sobre el ADN que todo el resto del mundo junto, gracias a 230 nuevas máquinas del modelo Applied Biosystems 3700 de Perkin-Elmer. Estos ingenios refinadísimos harán menos necesaria la intervención humana que los dispositivos más avanzados. Cada trimestre la nueva empresa hará públicas todas las secuencias del genoma humano que obtenga. Y los beneficios se sacarán de la venta del acceso a una base de datos que interpretará la secuencia bruta, así como aportará información crucial sobre las variaciones entre individuos que podrían permitir a los médicos adaptar los tratamientos a las constituciones genéticas individuales de los pacientes. La mayoría de los centros de secuenciación no estudian los datos que obtienen, simplemente los colocan por ahí como si estuvieran "fabricando caramelos o piezas de repuesto para coches".

La sociedad patentará varios cientos de los genes interesantes que espera encontrar incluidos en el genoma humano. Venter defiende la patente de los genes, diciendo que no constituyen ninguna amenaza para el progreso científico. Garantizan más bien, asegura, que los datos estén al alcance de otros investigadores, porque las patentes son documentos públicos. Su nueva compañía no patentará la secuencia misma del genoma humano, afirma.

"Vamos a hacer que el genoma humano no resulte patentable" dejándolo accesible al público, proclama. Durante los próximos tres años, todas las miradas convergerán sobre él para ver si es capaz de lograrlo.



Presentación de datos genéticos tal como los ofrece una máquina de secuenciar ADN. Aparatos más avanzados se las verán con el genoma humano completo

Arbol del Tule

¿Un solo pie o muchos fusionados?

Las estrechas asociaciones que existen entre el ser humano y la naturaleza se pueden apreciar en las expresiones culturales de la mayoría de las civilizaciones. Las plantas, sobre todo las que presentan características peculiares, guardan una estrecha vinculación con las poblaciones humanas del sur de México. Tal es el caso del árbol del Tule (*Taxodium mucronatum* Ten.), localizado en Santa María del Tule, Oaxaca.

Con sus 45,7 metros de diámetro a la altura del pecho (dap), esta taxodiácea presenta la mayor circunferencia del mundo. Por su majestuosa apariencia, ha desempeñado un papel muy importante en la historia y cultura local. *Taxodium mucronatum* es un árbol abundante, de 10-30 m de alto, que medra a lo largo de los ríos y cañadas de la mayor parte del territorio de México. Esta abundancia y amplia distribución se refleja en los diversos nombres que recibe: "ahuehuete", "ciprés", "pénjamu", "sabino" entre otros.

Además del árbol del Tule, otros individuos de esta especie han sido testigos de sucesos históricos. Citemos, por muestra, "el árbol de la Noche Triste" que se encuentra en la ciudad de México y a cuyo pie, según algunas narraciones, Cortés lloró tras haber sido derrotado por el pueblo mexica en 1520.

Se ha sugerido que el inmenso árbol del Tule de Santa María del Tule sea la fusión de varios individuos. No sería el primer caso de ello en la naturaleza. Dentro del género *Ficus*, J. D. Thomson, E. A. Herre, J. L. Hamrick y J. L. Stone observaron en 1991 que un solo árbol de ficus estrangulador en Panamá incluye genotipos múltiples, resultado de la fusión de diferentes individuos.

En 1990 G. H. Hall, G. M. Diggs, D. E. Soltis y P. S. Soltis examinaron la hipótesis de agregación del árbol del Tule a través de un estudio isoenzimático de las ramas principales. Llegaron a la conclusión de que la heterocigosis de las ramas principales del árbol del Tule para un alelo específico (Skdh-2b) contrastaba con la homocigosis para este *locus* presente en dos árboles vecinos, observación que respaldaba la hipótesis del origen de una sola plántula. Sin embargo, el bajo número de *loci* disponibles para la comparación no aportó fundamentación suficiente en que apoyar la hipótesis de la unicidad del árbol del Tule.



El árbol del Tule (Taxodium mucronatum Ten.) *de Oaxaca posee el tronco más ancho del mundo. Y es un solo individuo*

Mediante la técnica del RAPD (siglas en inglés de "polimorfismos de ADN multiplicados al azar) sometimos a prueba la hipótesis de la unidad genética del árbol del Tule. La técnica en cuestión sintetiza aleatoriamente *in vitro* segmentos de ADN a lo largo de todo el genoma del organismo bajo estudio; la multiplicación de estos fragmentos de ADN se lleva a cabo a través de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR).

Entendíamos que si las seis ramas principales del árbol eran idénticas para todos los *loci* de RAPD, entonces la posibilidad de que se tratara de un solo individuo, desde el punto de vista genético, era alta. Por contra, si se descubrían polimorfismos de RAPD entre las ramas principales del árbol, entonces habría que aceptar la hipótesis de genotipos múltiples para el árbol del Tule.

En el mundo vegetal los RAPD se han aplicado con éxito en cartografía genética, análisis de variación genética, estudios de biología reproductiva y rastreo de identidad por ADN, determinación de paternidad y establecimiento de marcadores moleculares asociados a características morfológicas específicas. Pero, igual que otras técnicas, también los RAPD tienen sus limitaciones. Así, debe evitarse la presencia de fragmentos de ADN (visualizados en una gel) que no son claros y que no presentan consistencia cuando se repite el experimento.

Además, hubo que investigar la variabilidad genética de poblaciones silvestres de la misma especie y compararla con los resultados del estudio del árbol del Tule. Con idéntico propósito se compararon los resultados con dos árboles vecinos del árbol del Tule.

Se podría objetar que, debido al tipo de dispersión del cono de *Taxodium*, basta un solo fruto para producir varias plántulas hermanas, siendo el árbol del Tule consecuencia de una asociación de semillas hermanas. Sin embargo, la dispersión de polen a través del viento limita

la posibilidad de que las semillas de un mismo cono procedan de la fecundación de polen de diferentes padres. La falta de variación genética registrada en el árbol del Tule sugiere que se trata de un solo individuo y no una población de plántulas hermanas.

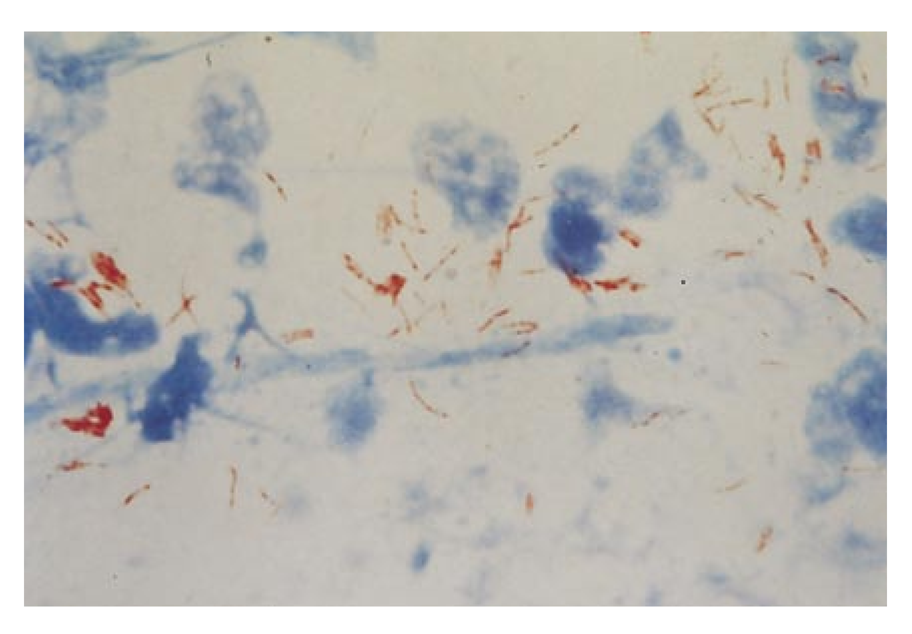
Ninguna de las seis ramas principales del árbol del Tule han mostrado variación en ninguno de los 149 *loci* de RAPD analizados. Es importante mencionar que en el estudio de Hall solamente se muestrearon 16 *loci*, de los cuales uno era polimórfico, en tanto que esa propiedad la presentaban en nuestra investigación, 31 *loci* (22,8 %). Este polimorfismo sólo se presentó en las poblaciones adicionales silvestres muestreadas y en árboles vecinos al del Tule.

Las mutaciones somáticas, si existen en el árbol del Tule, deben presentarse por debajo de la variación encontrada en las poblaciones silvestres muestreadas de *Taxodium mucronatum*. La ausencia de variación en las ramas principales del árbol del Tule fundamenta, entonces, la hipótesis de la individualidad genética del mismo.

Oscar Dorado, Gerardo Avila,
Dulce M. Arias,
Rolando Ramírez,
Guadalupe Valladares
y David Salinas
Centro de Educación Ambiental
e Investigación Sierra de Huautla
Universidad Autónoma del Estado
de Morelos (México)

Tuberculosis

Enfermedad reemergente



Microfotografía de Mycobacterium tuberculosis

La tuberculosis es una enfermedad antiquísima, considerada durante años la "peste blanca". Thomas Man, premio Nobel de literatura, convirtió a ese azote de la humanidad en motivo de *La montaña mágica*, novela donde se reflejaba la vida de los tuberculosos en los sanatorios de altura, único remedio contra la enfermedad antes del descubrimiento de su agente causal en 1882 por Roberto Koch y de los fármacos antimicrobianos para combatirla.

Creíase desde finales de los setenta que la enfermedad estaba controlada merced a la existencia de medios para diagnosticarla y fármacos para tratarla. No hay tal. Vuelve la tuberculosis, constituida en enfermedad "reemergente".

Para cuando termine el siglo, habrá más enfermos de tuberculosis en el mundo que antes de poseer los fármacos para tratarla. En este último decenio se morirán unos 30 millones de personas por esta enfermedad, si no se toman las medidas adecuadas para controlarla. Según la Organización Mundial de la Salud, aparecerá un tuberculoso por segundo. Se estima que un tercio de la población mundial está infectada por tuberculosis, cifrándose en más de 300 millones las personas que se infectarán en los próximos diez años.

Cada año surgen de ocho a diez millones de casos nuevos, con unos tres millones de muertes al año. Nos hallamos, pues, ante la enfermedad infecciosa más importante de todas. Mueren por su agresión más que por culpa de diarreas, cólera, paludismo, hepatitis o sida. La tendencia letal es ascendente, hasta alcanzar, según la OMS, la cifra de 5 millones en el año 2050 si las cosas no cambian.

En España podrían aparecer cada año entre 30 y 40 casos de tuberculosis por cada 100.000 habitantes. La mitad de tales episodios son contagiosos por vía respiratoria. Cada paciente no tratado contagia al año unas 10-15 nuevas personas.

Un 30 por ciento de los casos registrados en nuestro país suelen tener coinfección con el virus del sida, lo que complica la vida y el tratamiento de estos enfermos. Se da interferencia entre fármacos empleados en el tratamiento de cada enfermedad por sí misma. Se corre, además, un grave riesgo de contagio, a individuos sanos, de las personas con sida y tuberculosis. Sépase que ésta es la única infección oportunista de los enfermos VIH positivos que puede contagiarse por el aire a personas sanas VIH negativas.

Ultimamente ha hecho acto de presencia otro fenómeno preocupante. Me refiero a la resistencia desarrollada contra los tratamientos usuales, sobre todo en cepas de *M. tuberculosis* de enfermos con sida VIH+. Se produce lo que se denomina resistencia múltiple (a rifampicina e INH por lo menos) y que ha ocasionado muertes y pequeños brotes de contagio intrahospitalario.

El fenómeno de la resistencia múltiple encarece enormemente el tratamiento; la falta de medicamentos activos puede aconsejar recurrir a la cirugía. La OMS cifra en más de 50 millones las personas infectadas con cepas de *M. tuberculosis* con resistencia múltiple, lo que puede llegar a hacer a esta enfermedad "difícilmente curable".

Añádase a ello el retraso diagnóstico que convierte al enfermo contagioso en reservorio y fuente de infección. Al retener la endemia tuberculosa, puede ésta hacerse multirresistente y contagiar a otros miembros de la sociedad. Igualmente el abandono de los tratamientos o no cumplimentación por falta de control sanitario impide que algunos enfermos sanen definitivamente.

Para luchar contra este grave problema, que la OMS define como ame-

naza mundial y la ONU recomienda considerarla una cuestión prioritaria, se impone que las autoridades sanitarias destinen los fondos económicos adecuados para organizar un rápido diagnóstico y un tratamiento total.

Manuel Casal Román
Facultad de Medicina
Universidad de Córdoba

Avances en inmunodiagnóstico

Linfoma anaplásico

Los trasplantes y el sida, por razones distintas, han traído los linfomas al primer plano de la actualidad. Los linfomas son tumores malignos del tejido linfoide. Aunque se manifiestan de preferencia en los ganglios linfáticos, aparecen también en el tejido linfoide extraganglionar, en particular el relacionado con las mucosas: tracto digestivo, tiroides, parótida, piel, pulmón, timo y otros. A partir de su lugar de origen entran en la circulación linfática, colonizan la médula ósea y, según su agresividad, pasan a la sangre periférica.

Su conducta varía desde un grado de malignidad bajo (poco agresivos) hasta un alto grado (de mayor agresividad). Ese comportamiento biológico depende de factores diversos, relacionados unos con el tumor y otros con el huésped. Por consiguiente, la agresividad neoplásica variará según la estirpe, la diferenciación tumoral, el número de mitosis o proliferación, las características genéticas y del ciclo celular, así como la expresión de algunos marcadores inmunitarios.

El huésped combate la neoplasia con su sistema inmunitario, que en general suele estar comprometido, ya que un clon del mismo se ha hecho tumoral. No obstante, los individuos inmunocompetentes presentan linfomas en menor frecuencia que los inmunodeprimidos. Hay que recordar que, en las inmunodeficiencias congénitas y en las adquiridas, los linfomas son una de las neoplasias más comunes.

El sistema linfoide, que controla la inmunidad, es dinámico. Sus células cambian constantemente de morfología y función. Se acepta que la mayoría de los tipos celulares linfoides, por distintos factores cuyo mecanismo no acaba de conocerse bien, pueden hacerse tumorales. Las neoplasias formadas intentan remedar las funciones de las células normales. Para detectarlo, se recurre a estudios inmunohistoquímicos con anticuerpos monoclonales.

A la hora de buscar la causa de la patogenicidad se señala la activación de ciertos oncogenes, que presentan traslocaciones, o cambios de posición de segmentos génicos, características. Hay, asimismo, una verosímil vinculación entre la alteración funcional de los genes supresores *p*53 y *p*16 con la aparición de linfomas.

En el estudio de un linfoma hay que considerar distintos pasos. En primer lugar, la morfología óptica, la más importante, que aúna citología y arquitectura. Pero no es raro que esta morfología la compartan distintos subgrupos tumorales linfoides. Se hace, pues, necesaria la comprobación inmunohistoquímica de los receptores nucleares, citoplasmáticos y de membrana (imprescindibles para precisar naturaleza o estirpe y agresividad), así como otros receptores característicos diferenciales. A ese conjunto de resultados se denomina inmunofenotipo.

Se reconocen dos grandes grupos de linfomas: la enfermedad de Hodgkin (EH) (epónimo utilizado desde que Tomas Hodgkin lo describiera en 1832, dado que se desconocen las exactas características de la estirpe tumoral) y los restantes, los linfomas no hodgkinianos (LNH). Esta diferencia es importante sobre todo por la conducta post-terapia. Desde 1974, un protocolo experimental utilizado para el tratamiento de los linfomas tipo Hodgkin llevó a respuestas mantenidas alrededor de un 80 % de los casos, tratamiento que no conduce a la curación en el resto de los tipos no hodgkinianos.

El papel del morfólogo en el diagnóstico es crucial. En principio, la EH se diagnostica por una célula característica en un contexto arquitectural. Esta célula (reconocida por Sternberg y valorada por Dorothy Reed), llamada célula de Sternberg-Reed, corresponde a un blasto de entre 40 y 60 micras, de núcleo lobulado con nucleolos hiperplásicos y citoplasma variable (*figura 1*). La célula de Sternberg no es patognomónica, varía según los subtipos histológicos del Hodgkin y puede encontrarse en otros procesos tumorales o reactivos.

A diferencia de lo observado en otros linfomas (de células linfoides *B* o *T*), la aplicación de diferentes marcadores no demostró una estirpe definida en el tipo Hodgkin. Sin embargo, en 1983, se dispuso de un anticuerpo monoclonal (AcMo), el primero aislado en Kiel (Ki1); obtenido del líquido pleural de una paciente con Hodgkin, se aceptó como distintivo. La expresión de Ki1 y un



1. Célula de Sternberg de un LACG. Aspecto ultraestructural. Gran citoplasma con pocos orgánulos y núcleo con nucleolos hiperplásicos

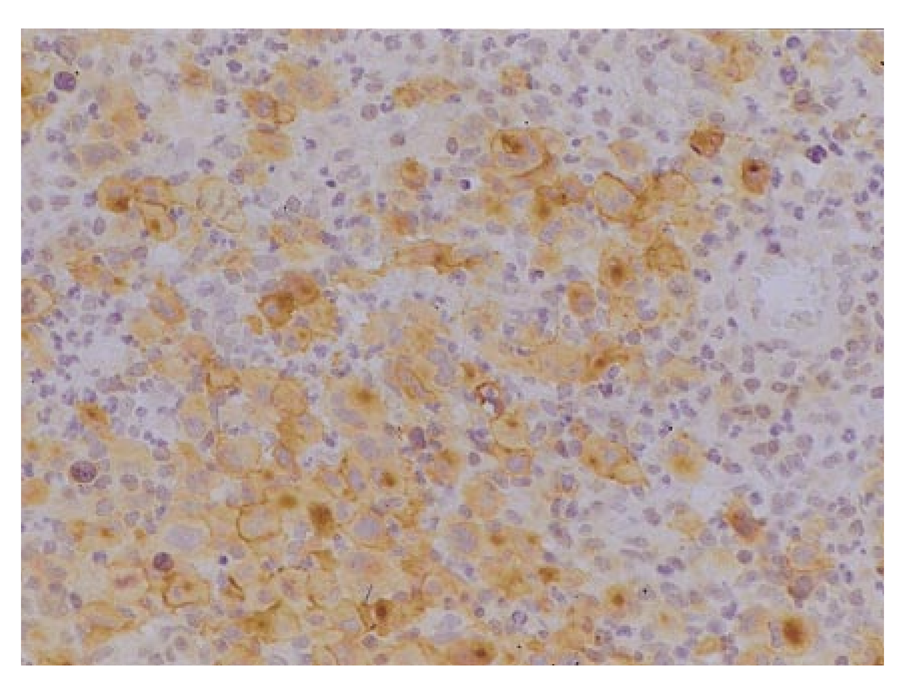
marcador mieloide maduro (LeuM1) caracterizan a esta célula. En la actualidad, el linfoma de Hodgkin se diagnostica por morfología e inmunofenotipo (*figura 2*).

Durante más de tres años se intensificó el estudio del AcMo Ki1 y se le reconoció como un anticuerpo de activación linfoide, denominándolo CD30. Al someter a prueba los distintos LNH con dicho anticuerpo, se descubrió que muchos linfomas de alto grado, sobre todo de naturaleza o estirpe *T*, podían expresarlo focalmente.

En 1984 se identificó un linfoma anaplásico, con grandes células (*figura 3*) que recuerdan las de Sternberg-Reed. Presentaba, además, una arquitectura difusa o nodular y se extendía a senos ganglionares. Se le denominó linfoma anaplásico de células grandes Ki1 (LACG) y se incluye dentro de los LNH de alto grado de agresividad, cuyas células tumorales son de estirpe linfocitaria *B*, *T* o nula (no *B* no *T*).

La caracterización de este aparente nuevo subtipo de linfoma revestía enorme interés para los morfólogos. Si nos limitáramos a considerar sólo la morfología óptica de rutina, se confundirían con dicho linfoma otras neoplasias de citología anaplásica y de estirpe no linfoide. La aplicación de un panel de estudio inmunohistoquímico adecuado (anti-queratinas, anti-antígeno linfocitario común y anti Ki1) permitió un exacto diagnóstico de linfoma. Tras un estudio exhaustivo, revisando carcinomas, melanomas, sarcomas, tumores desdiferenciados de célula grande anaplásica, histiocitosis y casos de Hodgkin depleción, nuestro grupo demostró que, aproximadamente en un 27 por ciento, el LACG no había sido correctamente diagnosticado.

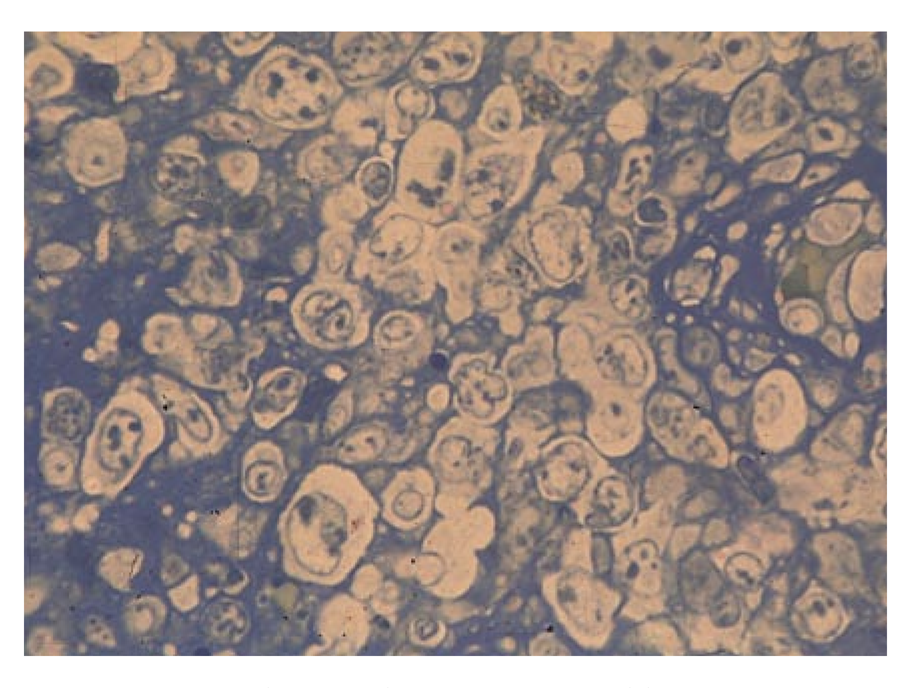
Desde el punto de vista del enfermo, este tumor mostraba una aparente mejor evolución que otros tipos de LNH de alto grado de malignidad, sobre todo en edad infantil y en localización cutánea. En 1989 Lennert y Brittinger señalaron la experiencia de la Universidad de Kiel con un grupo de más de 80 pacientes adultos, portadores de LACG, en la que parecía asimismo que la evolución era menos agresiva. Estos datos no se confirmaron en ese tiempo por otras escuelas; al contrario, se aceptó que desde el punto de vista diagnóstico, tratamiento y evolución, el linfona anaplásico de células grandes era una variante de los LNH de alto grado.



2. Expresión del anticuerpo Ki1-CD30 en membrana y Golgi de las células LACG

Desde 1989, nuestro grupo de la Universidad Autónoma de Madrid ha venido estudiando un número importante de enfermos de LACG. Hemos contado con la colaboración de patólogos de otros centros y, en los casos considerados, se ha caracterizado la morfología óptica, inmunofenotipo, ultraestructura, genotipo, ciclo celular y caracteres clínico-evolutivos. En un primer momento parecía que se podía aceptar lo anteriormente expuesto, es decir, que el LACG era un LNH de alto grado de agresividad. Tal concepción se debió probablemente a que se habían incluido casos de linfoma *B* y *T* con expresión del antígeno Ki1 al lado de auténticos LACG.

En 1992, junto a la doctora Ageitos, nos concentramos en la información recabada sobre casos de LACG entre enfermos diagnosticados de Hodgkin agresivo con mala respuesta a la terapia. Nos



3. Citología anaplásica característica del LACG

interesaban sobre todo los casos de Hodgkin depleción. Corresponden a los subtipos con escasos linfocitos y abundantes células de Sternberg. Un porcentaje alto debía atribuirse a lo que en ese momento conocíamos como LACG. Esa fase del trabajo nos ayudó a centrar el objeto de la investigación: considerar si el LACG constituye un nexo de unión entre los LNH y la EH.

El estudio histopatológico y citológico mostró la existencia de linfomas de citología anaplásica que recuerdan subtipos agresivos de EH, hasta entonces diagnosticados de EH depleción o EH tipo esclerosis nodular (con alto contenido en células de Sternberg). El inmunofenotipo de estos casos muestra positividad para CD30 y CD15, añadiéndose en algunos otros marcadores EMA, BNH9 y el receptor de la IL2. Estos marcadores se denominan de activación histológica, ya que no se ha podido demostrar, a excepción de la IL2, la activación linfoide *in vitro*. Para algunos autores estos casos serían LACG relacionados con la EH, en vez del LACG clásico.

Considerando estos dos grupos, LACG clásico y LACG-EH relacionado, su diferencia estriba en la histología y en el inmunofenotipo. Desde el punto de vista clínico no hay en principio rasgos diferenciales, aunque puede tratarse de una enfermedad más agresiva, con grandes tumores, pero la edad de presentación y la distribución por sexos pueden también compartirlas EH y LACG.

Teniendo en cuenta que los casos de EH con esta morfología no muestran marcadores inmunohistoquímicos de estirpe (linfocitos *B* o *T*) en las células de Sternberg-Reed y que los estudios moleculares corroboran la ausencia de reordenamiento *B* o *T*, en muchos casos, se eligió un grupo de 65 enfermos de LACG para conocer y relacionar los hallazgos inmunohistoquímicos y moleculares, encontrando una discordancia de un 17 %.

Comprobamos con estudio inmunohistoquímico (para demostrar naturaleza, proliferación y expresión de marcadores de activación) que, fuera cual fuere el patrón de crecimiento tumoral (nodular y difuso) y la citología (más anaplásica o más sternbergoide), la presencia constante de marcadores de activación y el predominio de casos nulos (sin marcadores) o con marcadores *B*.

En el estudio molecular con el método de la reacción en cadena de la polimerasa para demostrar naturaleza linfoide *B* o *T*, un 75 % de los casos de LACG-EHR relacionado no reordenó y un 25 % de casos lo hizo con las cadenas pesadas de las inmunoglobulinas (células *B*). El de los LACG clásicos mostró un reordenamiento *B* en un 73 por ciento y *T* en un 17 por ciento.

Desde el punto de vista citogenético, muchos autores describen la traslocación (2;5) como característica del LACG de naturaleza *T*. En nuestra experiencia sólo un caso de LACG de estirpe *T* presentó una traslocación (2;5) incompleta.

El linfoma anaplásico de células grandes y la enfermedad de Hodgkin comparten citología con signos de activación, a veces el inmunofenotipo e incluso la positividad para la proteína latente de membrana del virus de Epstein Barr, hecho que se describía como característico de la EH por implicar dicho virus en la patogenia de este linfoma.

El linfoma anaplásico, considerado casi quince años después de su descripción, parece ser una entidad propia, relacionada con la enfermedad de Hodgkin porque comparten la citología neoplásica. Es un tumor de agresividad intermedia, recidivas y clínica tórpida. No muestra una remisión completa si se trata con los protocolos terapéuticos de la EH. Necesita una terapia más agresiva y las remisiones completas, parciales, dependerán de la extensión (estadio) de la enfermedad (experiencia propia de 90 casos).

En los casos de diagnóstico diario, el patólogo observa de forma frecuente que casos de EH refractarios a la terapia muestran recidivas con imágenes anaplásicas (el llamado linfoma anaplásico secundario). ¿Es lo que antes llamábamos Hodgkin depleción? Creemos que en estos casos se trata del mismo tumor con mayor diferenciación.

En la actualidad seguimos con el estudio de este tema controvertido, con técnicas moleculares más refinadas y con un mayor número de enfermos. Todo este interés tiene por objeto llegar al correcto diagnóstico de este subtipo de tumores, para que los enfermos puedan recibir una terapia adecuada.

Carmen Rivas Manga
Dpto. Anatomía Patológica,
Fundación Jiménez Díaz.
UAM. Madrid

Tablas Pruténicas

Un nuevo examen

Desde la Antigüedad los astrónomos se han propuesto predecir las posiciones de los astros en el cielo. Para lograrlo, necesitaban crear modelos predictivos de los movimientos planetarios que estuvieran basados en sus observaciones. En el siglo ii a.C., el astrónomo y matemático griego Hiparco inauguró el gran período de la astronomía griega gracias a sus modelos geométricos y a sus observaciones. Ptolomeo continuó la labor de Hiparco y perfeccionó sus modelos en el siglo ii de nuestra era.

Al observar la revolución de los planetas en el cielo, Ptolomeo dedujo sus períodos de revolución así como las anomalías que presentaban en su periodicidad. El *Almagesto* de Ptolomeo es una de las obras más gigantescas de la historia de la ciencia: en ella se acumulan miles de valores numéricos, que son el resultado de cálculos trigonométricos y que permiten calcular las posiciones de los planetas y de centenares de estrellas a lo largo de los siglos.

En el siglo xii Occidente descubrió las tablas planetarias a través de la traducción del *Almagesto*. El desarrollo de la astronomía, estimulado por el interés que los notables sentían por la astrología, suscitó la producción de nuevas tablas astronómicas. Durante los siglos xii y xiii estas tablas fueron, en general, el resultado de traducciones del árabe.

Más tarde, hacia 1320, se conocieron en los medios astronómicos parisienses las *Tablas Alfonsíes*, encargadas por el rey Alfonso X de Castilla. Como todas las demás, constaban sólo de columnas de cifras y debieron su éxito a ciertas características formales que facilitaban la interpretación de la manera de utilizarlas. El interés que despertaron fue tan grande, que suplantaron a todas las restantes. No obstante, aunque su utilización resultara más fácil, no eran más precisas que las tablas anteriores: los valores numéricos estaban copiados de otras fuentes y los errores se repetían.

En 1543 Copérnico publicó el *De revolutionibus* que también contenía unas tablas astronómicas. En esta obra la Tierra deja de ser el centro del universo y es sustituida por el Sol. Copérnico recupera los datos del *Almagesto* pero modifica el sistema de referencias: sustituye la Tierra

inmóvil por el Sol y hace que la Tierra y los planetas giren en torno al Sol. Para calcular sus tablas, Copérnico se contenta con un número muy reducido de observaciones y no aplica ningún juicio crítico a las observaciones de sus predecesores. Elige observaciones con importancia histórica o que no se alejan en exceso de sus resultados propios.

Así, para establecer la excentricidad de la órbita terrestre (la distancia entre el centro de la órbita terrestre y el Sol), utiliza únicamente tres observaciones: una de Ptolomeo, otra de al-Battani —un astrónomo árabe del siglo IX—, y una tercera que él mismo llevó a cabo en 1515. Los tres valores resultan bastante próximos pero parecen apuntar a una disminución de la excentricidad: por ello, Copérnico construye una ley de variación de la excentricidad compatible con estos tres puntos y deduce, de ella, los puntos intermedios que no corresponden a la realidad, ya que la excentricidad no varía tal como él se imagina. En el sistema planetario de Copérnico casi todos los parámetros orbitales varían en función del tiempo, con lo que se realizan esfuerzos para justificar las divergencias entre observación y teoría.

NICOLAI COPERNICI

Martis prosthaphæreses.

Numeri communes.		Prosthaphæreses eccentri.		Scrup. proportionum		Parallaxes orbis.		Excessus parallaxeos.	
Gra.	Gra.	Gra.	scr.	scr.	2"	G.	scr.	G.	scru.
3	357	0	32	0	0	1	8	0	8
6	354	1	5	0	2	2	16	0	17
9	351	1	37	0	7	3	24	0	25
12	348	2	8	0	15	4	31	0	33
15	345	2	39	0	28	5	38	0	41
18	342	3	10	0	42	6	45	0	50
21	339	3	41	0	57	7	52	0	59
24	336	4	11	1	13	8	58	1	8
27	333	4	41	1	34	10	5	1	16
30	330	5	10	2	1	11	11	1	25
33	327	5	38	2	31	12	16	1	34
36	324	6	6	3	2	13	22	1	43
39	321	6	32	3	32	14	26	1	52
42	318	6	58	4	3	15	31	2	2
45	315	7	23	4	37	16	35	2	11
48	312	7	47	5	16	17	39	2	20
51	309	8	10	6	2	18	42	2	30
54	306	8	32	6	50	19	45	2	40
57	303	8	53	7	39	20	47	2	50
60	300	9	12	8	30	21	49	3	0
63	297	9	30	9	27	22	50	3	11
66	294	9	47	10	25	23	48	3	22
69	291	10	3	11	28	24	47	3	34
72	288	10	19	12	33	25	44	3	46
75	285	10	32	13	38	26	40	3	59
78	282	10	42	14	46	27	35	4	11
81	279	10	50	16	4	28	29	4	24
84	276	10	56	17	24	29	21	4	36
87	273	11	1	18	45	30	12	4	50
90	270	11	5	20	8	31	0	5	5

Martis

1. Las tablas astronómicas, como esta de Copérnico, proporcionaban listas de valores numéricos con las que podía calcularse la posición de todos los planetas para cualquier fecha

Los planetas del sistema copernicano describen, en principio, círculos en torno al Sol aunque, en realidad, el sistema está sobrecargado de epiciclos (pequeñas trayectorias circulares que se superponen al movimiento general), fluctuaciones mínimas cuya función es compensar las irregularidades aparentes.

Copérnico sigue siendo prisionero de la astronomía ptolemaica porque confía plenamente en las observaciones de sus predecesores. Complica su bella mecánica para lograr adaptar su modelo a las observaciones sin imaginar la posibilidad de que éstas estén contaminadas por errores. Se desconoce, entonces, la noción de error experimental.

El año 1551 constituye un hito fundamental en la historia de las tablas planetarias. Es el año en el que se publican las *Tablas Pruténicas*, obra del astrónomo alemán Erasmus Reinhold, las primeras que se basan en las hipótesis de Copérnico. Aunque Reinhold no parece haber creído en la hipótesis heliocéntrica, invierte siete años de su vida en recalcular, completar y corregir los datos publicados en el *De revolutionibus*. La precisión de sus tablas es mil veces superior a la de las tablas de Copérnico y Reinhold pretende que, en lo sucesivo, se podrá prever la posición de las estrellas y de los planetas durante siglos.

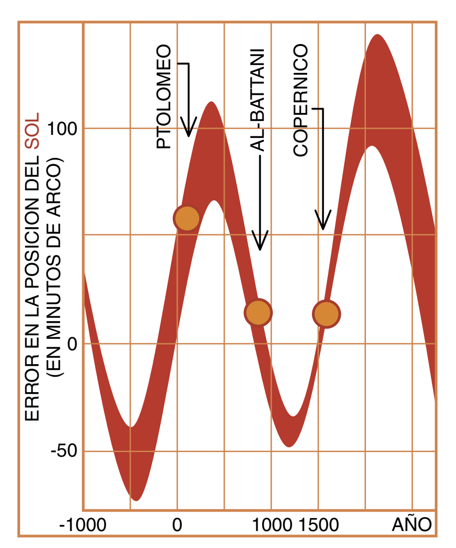
Esta afirmación resultó errónea ya que los errores, que eran mínimos en el momento en el que se calcularon las tablas, crecieron ineludiblemente con el transcurso del tiempo.

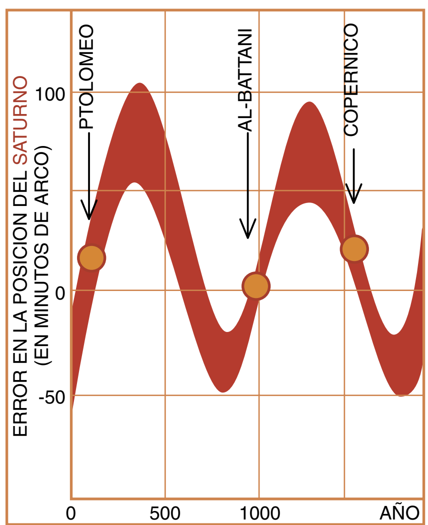
Para analizar las teorías planetarias antiguas, en este caso las *Tablas Pruténicas*, se reconstruyen los procedimientos utilizados por sus autores para establecerlas. Hemos intentado describir el modelo cinemático de cada planeta así como redescubrir las constantes y los parámetros fundamentales. Reinhold no explicita nunca los valores que utiliza ni detalla sus cálculos y, además, emplea valores distintos de los de Copérnico.

Una vez aclarados los procedimientos utilizados para construir estas tablas y tras haber aislado cada parámetro orbital y haber estudiado su evolución en el tiempo, hemos recopilado todos estos datos en formato informático. A continuación, hemos comparado el movimiento de los planetas establecido por Reinhold con el que se desprende de las teorías planetarias modernas, elaborado por el Bureau des Longitudes en los años ochenta, que resulta extraordinariamente preciso durante largos intervalos de tiempo: las *Tablas Pruténicas* —o sea toda la construcción de Copérnico— estaban destinadas, de manera inexorable, a deteriorarse en menos de un siglo. Una mala aproximación a la precesión de los equinoccios y el desconocimiento de la gran desigualdad de Júpiter y Saturno resultan responsables, en parte, de este deterioro.

El eje de rotación de la Tierra cambia de dirección a lo largo del tiempo, de tal modo que el punto origen de coordenadas de los astros se desplaza con respecto a las estrellas con una velocidad angular de 50 segundos por año: es la precesión de los equinoccios. Copérnico estaba convencido de que este movimiento de precesión no era uniforme y le atribuía una variación cuyos efectos resultaban perceptibles tras largos períodos de tiempo. Esta corrección degrada periódicamente todas las posiciones de los cuerpos celestes y las divergencias entre predicción y observaciones astronómicas empezaron a crecer en la segunda mitad del siglo XVI.

Cuando se comparan los datos obtenidos a partir de las *Tablas Pruténicas* con los resultados derivados de las teorías modernas se constata que el error principal cometido en lo que se refiere a la posición del Sol en el cielo (debido a la corrección errónea de la precesión de los equinoccios) evoluciona con un período de unos 1700 años (*véase la figura 2*). Las posiciones más correctas corresponden a las épocas en las que Ptolomeo, al-Battani y Copérnico llevaron a cabo sus observaciones (Copérnico había adaptado su modelo para que diera precisamente estos resultados). A esto se añaden otros factores que contribuyen a degradar las previsiones a largo plazo, con lo que los modelos cinemáticos se desvían de la realidad de manera progresiva.





2. Reinhold, en sus Tablas Pruténicas*, proporcionaba los medios para calcular la posición de los astros con una antelación de varios centenares de años. Para evaluar la precisión de estas predicciones, el autor ha comparado las posiciones calculadas con estas tablas con las que se desprenden de los modelos astronómicos actuales. Con este propósito, ha establecido la diferencia entre las posiciones de los astros según Reinhold y según los modelos actuales a lo largo de grandes períodos de tiempo. Si las previsiones de Reinhold hubieran sido correctas, la diferencia sería nula. Se constata que los errores relativos a la posición del Sol* (izquierda) *y a la de Saturno* (derecha) *son periódicos. Las mediciones realizadas por Ptolomeo, en el siglo II, por al-Battani, en el siglo IX y por Copérnico en 1515 resultan coherentes ya que Copérnico se esforzó para adaptar su modelo a estas observaciones.*

Los errores mayores afectan al planeta Mercurio ya que las posiciones calculadas divergen, a veces, en más de diez grados con respecto a las reales. Por suerte, estas desviaciones se producen en momentos en los que este planeta no resulta observable desde la Tierra. Aunque, en el caso de Venus, los errores resulten inferiores a cuatro grados, este tipo de incertidumbres impide cualquier previsión de un tránsito de estos dos planetas por delante del Sol.

Júpiter y Saturno resultaban particularmente interesantes para los astrólogos de los siglos XVI y XVII: pretendían que las conjunciones de Júpiter y Saturno eran fenómenos esenciales que marcaban el ritmo de toda la historia universal y anunciaban grandes acontecimientos. Unas tablas astronómicas que permitieran predecir con precisión estas conjunciones destronarían fácilmente a todas las demás. Se da el caso de que los movimientos de ambos planetas salen bastante bien parados en las *Tablas Pruténicas*. Esto se explica, sobre todo, por el hecho de que Júpiter y Saturno son planetas lentos y los errores de los modelos se manifiestan también lentamente.

Por otra parte, los resultados estaban perturbados por la "gran desigualdad de Júpiter y Saturno". Copérnico ignoraba esta anomalía pero, desde su tiempo, se ha podido comprobar la existencia de deceleraciones de Saturno y de aceleraciones de Júpiter. Estas perturbaciones, cuyo período es de unos 900 años, son la causa de anomalías de gran amplitud, pero Copérnico tuvo suerte: las aceleraciones y deceleraciones de ambos planetas tenían escasa entidad en el momento en el que hizo sus observaciones, entre 1514 y 1529.

Los matemáticos deducían de las tablas astronómicas y, en particular, de las *Tablas Pruténicas*, las efemérides que indicaban la posición de los astros para cada día del año. A continuación, los astrólogos interpretaban estas efemérides y sus almanaques constituían una lista de recomendaciones y de prohibiciones, destinadas sobre todo a los campesinos (Napoleón III, al darse cuenta de los efectos desastrosos que tenían estos almanaques, prohibirá su publicación).

La adopción de las *Tablas Pruténicas* por los astrónomos europeos del siglo XVI contribuyó a legitimar el sistema heliocéntrico al demostrar la calidad de las previsiones astronómicas de Copérnico. No obstante, cuando se analiza el tema con detalle, se advierte que las previsiones se degradan de forma irresistible y, a veces, con rapidez.

La obra titánica que constituyen estas tablas se mantuvo en vigor durante casi 80 años. Dominaron el panorama hasta 1627, el año en el que aparecen las *Tablas Rudolfinas* de Kepler. Estas últimas se basaban en el movimiento elíptico de los planetas en torno al Sol, prescindían del estorbo de los epiciclos y se habían fundamentado en las numerosas informaciones proporcionadas por Tycho Brahe, el cual había comprendido la necesidad de renovar el banco de datos de las observaciones. Las nuevas tablas serían utilizadas a lo largo de casi todo el siglo XVII.

Denis Savoie
Observatorio de París.

Cultivo de la vida

Puede que las células madre hagan realidad la regeneración tisular

Muchas enfermedades mortales suponen la degeneración irreversible de células y de tejidos importantes. Es el caso de las células de los islotes pancreáticos en la diabetes o el de las neuronas cerebrales en las enfermedades de Parkinson, de Huntington y otras afecciones neurológicas. Durante muchos años los investigadores han soñado con cultivar en el laboratorio células humanas que pudieran colonizar y regenerar el tejido defectuoso. Pero la biología no ayudaba. Las células cancerosas crecen rápidamente en una placa de cultivo, pero las células normales y sanas dejan pronto de propagarse fuera del organismo.

Descubrimientos recientes apuntan a una solución. Han podido identificarse y cultivarse durante muchos meses raras "células madre" procedentes de diversos tejidos fundamentales. Estas células tienen la característica de que, si se implantan en el tipo apropiado de tejido, regeneran la estirpe de células que suele encontrarse allí. Se han descubierto células madre en los sistemas nervioso, muscular,

cartilaginoso y óseo. Es muy probable que existan en las células de los islotes pancreáticos y en el hígado. Más sorprendente todavía es que trabajos aún no publicados hayan convencido a acaudalados empresarios de que células fetales especiales pudieran producir una amplia variedad de células tisulares específicas.

Irving L. Weissman, de la Universidad de Stanford, descubrió en 1991 un tipo de célula madre humana que se encuentra en la médula ósea y que da lugar a la gama completa de células sanguíneas. Muchos pacientes de cáncer, cuya médula había sido destruida por dosis elevadas de radiación o de quimioterapia, se han salvado gracias al trasplante de células derivadas de la médula ósea. Las células madre trasplantadas establecen los linajes de todas las células hemáticas.

Pero ha sido una sorpresa averiguar que existen células madre en órganos como el cerebro, donde pueden originar los tres tipos celulares comunes, astrocitos, oligodendrocitos y neuronas. En palabras de Ronald D. G. McKay, del Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos e Ictus de Estados Unidos, el descubrimiento "contradice a los libros de texto". Según él, ha demostrado que las células madre del sistema nervioso central crecidas en su laboratorio pueden injertarse en cerebros de ratón y aliviar los trastornos de comportamiento de animales tratados mediante ingeniería genética para que imiten la enfermedad de Parkinson. Tampoco cabía esperar que existieran células madre en los islotes pancreáticos ni en el hígado de los adultos, pero hay muchos indicios en este sentido.

Aunque es posible que no haya más que una por cada varios millares de células corrientes, las células madre pueden aislarse gracias a las moléculas específicas que despliegan en su superficie. Una forma de aprovecharlas sería, pues, extraerlas de muestras de tejido de los pacientes o de otros donantes y luego multiplicarlas en el laboratorio, posibilidad que es estudiada por varias empresas.

Systemix, una división del gigante farmacéutico suizo Novartis situada en Palo Alto, California, está sometiendo a prueba sus técnicas para aislar de la médula ósea células madre productoras de sangre, lo que mejoraría los trasplantes de médula habituales. Las células tomadas de un donante producirían también tolerancia a las restantes células del mismo por parte del sistema inmunitario del paciente, lo que augura el futuro papel que pudieran desempeñar en la prevención del rechazo de trasplantes. Weissman creó la compañía, StemCells, Inc., que ahora pertenece a Cyito Therapeutics, cuyo objetivo consiste en establecer líneas de células madre de órganos sólidos. En Osiris Therapeutics, en la que también participa Novartis, se están ensayando preparaciones de células madre mesenquimatosas obtenidas del propio paciente para la regeneración del cartílago lesionado y de otros tipos de tejido.

Ahora bien, las células madre específicas de tejido en crecimiento, ya procedan de donantes o de pacientes, tienen un inconveniente muy preocupante, como expone Thomas B. Okarma, de Geron en Menlo Park, California. Para reinjertarse satisfactoriamente en la médula ósea de un paciente, las células madre hemáticas tienen que dividirse con rapidez. Con cada división se acortan ligeramente las estructuras del final de los cromosomas conocidas como telómeros. La consecuencia es que las células reinjertadas envejecen prematuramente, lo que quizá limite sus posibilidades de crecimiento.

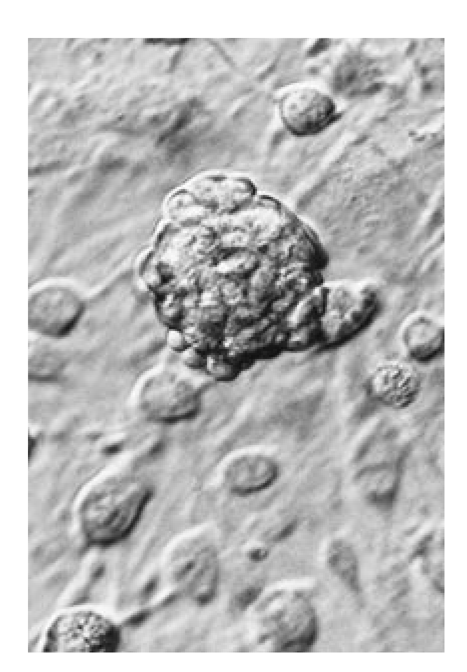
Esta es la razón de que trabaje en la obtención de células madre y otros tipos de células específicas de tejido de una fuente diferente: las células embrionarias, que no envejecen. Estas células, que son el colmo de la versatilidad, podrían cultivarse indefinidamente y producir todos los tipos celulares encontrados en el organismo, pues se parecen a lo que en los animales se denominan células madre embrionarias.

Las células madre embrionarias de ratón se extraen de embriones vivos en estadios muy iniciales. Cuando se inyectan en un embrión en desarrollo, se multiplican y se desarrollan en todos los tipos de tejido. Las restricciones legales imperantes en EE.UU. impiden que pueda usarse esta misma técnica para aislar células madre embrionarias humanas, ya que cualquier institución que lo hiciera perdería probablemente todas las subvenciones federales. Pero John D. Gearhart, profesor de ginecología y obstetricia de la Universidad Johns Hopkins, ha empleado un método diferente para establecer líneas celulares humanas que parecen tener las características de las células madre embrionarias.

Gearhart sabía que las células precursoras de las gónadas fetales de ratón se comportan como células madre embrionarias verdaderas, de manera que, con ayuda del becario posdoctoral Michael Shamblott, estableció líneas germinales embrionarias humanas a partir de células precursoras de las gónadas, que obtuvo de fetos abortados. Está probando ahora si esas células pueden transformarse en realidad en una gama completa de tipos celulares humanos (implantándolas en ratones cuyo sistema inmunitario no funcionara, lo que origina tumores). Por ahora se limita a decir que ha



Michael Shamblott (izquierda) *y John D. Gearhart han aislado células humanas que pueden transformarse en una amplia gama de tejidos*



Células germinales embrionarias humanas (grupo del centro) *se alimentan de otras células* (fondo)

visto la formación de "varios tipos celulares" en los tumores, proponiéndose publicar los detalles completos dentro de algunos meses. Si tales líneas celulares fuesen capaces de originar células de todos los tipos de tejidos, podrían convertirse en una fuente duradera de células de tejido y de células madre humanas.

Hay varios equipos investigadores que han demostrado en el último año que las células madre embrionarias animales pueden ser inducidas a transformarse en células específicas de tejido mediante técnicas de ingeniería genética. Por ejemplo, el de Loren J. Field, de la Universidad de Indiana, ha desarrollado células musculares cardíacas a partir de células madre embrionarias de ratón añadiéndoles secuencias específicas de ADN. Las células resultantes se injertan en un corazón en desarrollo. McKay ha sido capaz de crear células madre del sistema nervioso central a partir de células madre embrionarias de ratón. Para James A. Thomson, de la Universidad de Wisconsin, "las células embrionarias humanas tendrían profundas consecuencias para el tratamiento de las enfermedades".

Geron tiene el proyecto de desarrollar técnicas para convertir las células de Gearhart en tipos útiles desde el punto de vista médico. Dado que las células germinales embrionarias no envejecen, tiene que ser posible alterar sus características inmunológicas mediante ingeniería genética. Por ejemplo, los médicos que estuvieran tratando a un paciente necesitado de un nuevo tejido neuronal, podrían convertir células de los bancos celulares que fueran compatibles con las del paciente en precursores neuronales y colocarlas en su cerebro. (En la actualidad se utiliza a veces el tejido fetal, pero su disponibilidad es limitada.) Si se necesitara una compatibilidad exacta, podría incluso utilizarse una técnica conocida como transferencia nuclear para crear un tejido que fuera idéntico desde el punto de vista inmunológico al propio del paciente.

En Geron están también muy interesados por la telomerasa, una enzima que impide el acortamiento de los telómeros situados al final de los cromosomas, cada vez que se divide la célula. Sus investigadores demostraron a principios de este año que cuando se activa de manera artificial la telomerasa en células humanas que no la expresan normalmente, las células se dividen en cultivo de manera indefinida. Se piensa investigar si la telomerasa permitiría el cultivo indefinido de células madre de tejidos específicos.

El aislamiento y el cultivo de las células madre sigue siendo una tarea complicada. Se requerirían además análisis muy rigurosos antes de que los médicos pudieran introducir células modificadas en un paciente, porque entra dentro de lo concebible que se volvieran cancerosas. Pero cada vez se ven más claras las grandes posibilidades terapéuticas que tiene a largo plazo el tratamiento con células madre. Hasta que llegue ese momento, muchas empresas albergan la esperanza de que las células madre humanas contribuyan al desarrollo farmacológico.

Podrían incluso hacer realidad la eterna promesa que es la terapia génica. Esta técnica no se ha convertido todavía en un modo de tratamiento práctico porque ha resultado difícil introducir los genes terapéuticos activos en las células maduras. Pero si se consiguiera incorporarlos a unas cuantas células madre, se las podría cultivar y aportarlas luego en cantidad.

¿Cuánto queda hasta que las células madre se utilicen ampliamente? Hay quien calcula que se sabrá fabricar tipos celulares específicos dentro de cinco años.

Tim Beardsley

Contaminación ambiental

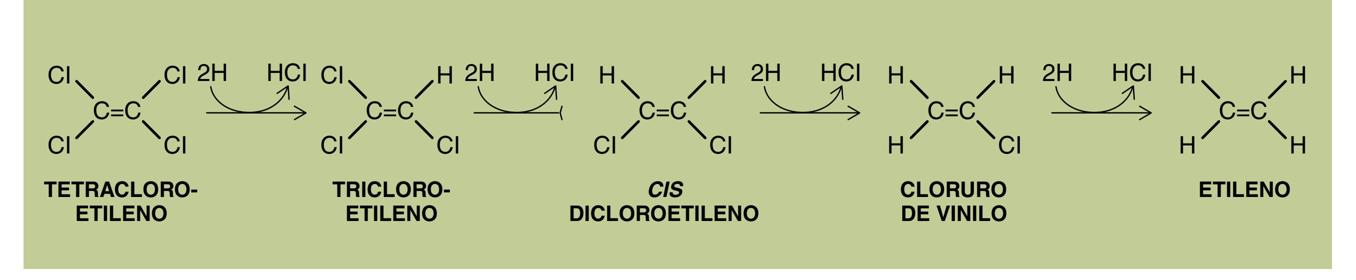
Bacteria eliminadora de cloroetenos

En el movimiento en pro de la salud del medio ambiente hay una palabra mágica que está ganando adeptos: biodescontaminación, término que designa la regeneración de un entorno contaminado por compuestos nocivos a través de la acción bacteriana. En este contexto, una nueva bacteria encabeza las esperanzas para la detoxificación de cloroetenos. Se trata de *Dehalococcoides ethenogenes* cepa 195.

Los cloroetenos son solventes orgánicos volátiles que se emplean en el lavado en seco de ropa, en la producción de colas y quitamanchas y, como desengrasantes, en aviones y maquinaria industrial y militar. Debido a su uso generalizado y a su manejo, almacenamiento y emisiones no contaminadas, estos contaminantes se encuentran distribuidos ampliamente, sin excluir las aguas subterráneas. Tal fenómeno no constituiría un problema mayor si no fuera porque los cloroetenos, muy difíciles de degradar, son, además, tóxicos y cancerígenos. Por eso, en el norte de Europa y los EE.UU se han tomado estrictas medidas de control de su emisión.

En los últimos años, se han invertido importantes recursos monetarios y humanos en el desarrollo de técnicas para la degradación de cloroetenos. Aunque se han aplicado métodos fisicoquímicos para extraer estos solventes de suelos y aguas contaminadas, su puesta en práctica resulta carísima, poco eficiente y a duras penas soluciona el problema sin perturbar a la vez la zona contaminada. Ante esa situación, la detoxificación de cloroetenos mediante bacterias puede constituir el método ideal para hacer frente al problema de una forma menos cara, más respetuosa con el entorno y, en principio, más eficaz.

En medios aeróbicos, de respiración de oxígeno, el tetracloroetileno no es biodegradable. Por su parte, el tricloroetileno es persistente, recalcitrante. En ambientes anaeróbicos, carentes de oxígeno, uno y otro compuesto se detoxifican a través de una secuencia de reacciones. La bacteria usa los cloroetenos del mismo modo

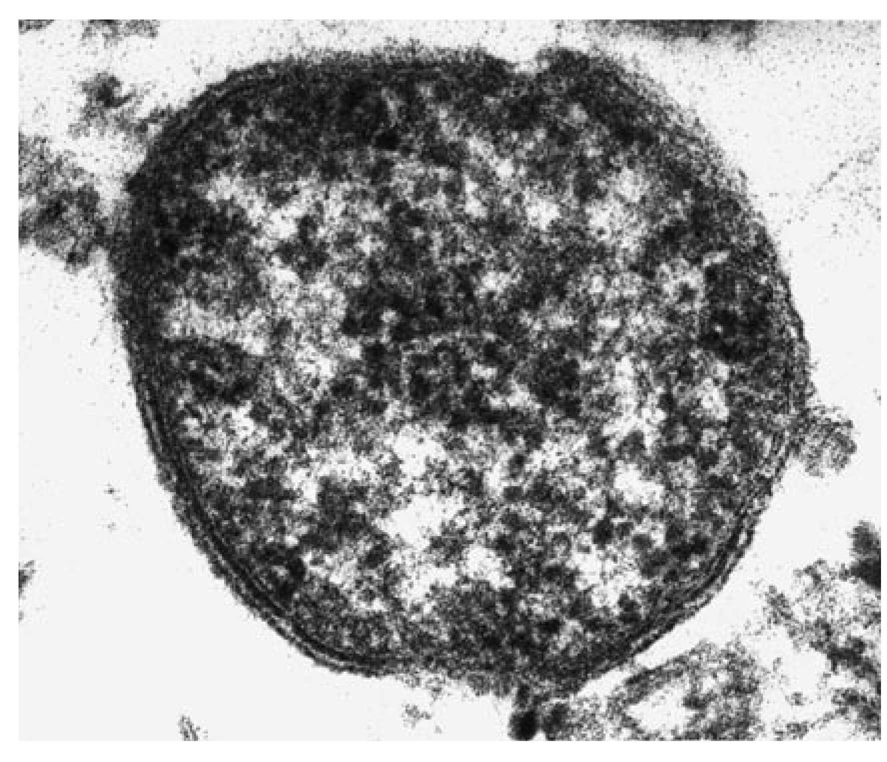


Secuencia de reacciones sucesivas a través de la cual se extraen de la molécula cuatro cloros del tetracloroetileno (PCE) para producir etileno, una sustancia inocua. Cada una de las reacciones es una declorinación reductiva, en la que la molécula se reduce al intercambiar un átomo de cloro por uno de hidrógeno

que nosotros usamos el oxígeno. En su caso se produce una respiración anaeróbica en la que los cloroetenos actúan como aceptores finales de electrones. Los átomos de cloro se van eliminando secuencialmente y se van sustituyendo por hidrógenos, generando como producto final el gas etileno, un compuesto inocuo que, en otro contexto, causa la maduración de la fruta.

Aunque en la naturaleza se produce la detoxificación total de tetracloroetileno a etileno, hasta ahora no se había logrado aislar ningún organismo capaz de efectuar este beneficioso proceso. Tras años de intenso trabajo, y gracias al apoyo financiero del Centro de Técnicas Avanzadas de la Universidad de Cornell y el Ejército norteamericano del Aire, un equipo de la Universidad de Cornell, liderado por S. Zinder, J. Gossett y el autor de este artículo, han aislado el primer microorganismo capaz de detoxificar cualquier cloroeteno. Lo han denominado *Dehalococcoides ethenogenes* cepa 195. Esta bacteria no sólo no se ve afectada por la toxicidad de los cloroetenos, sino que los utiliza como fuente de energía para crecer y dividirse.

En junio del año pasado se dio a conocer en *Science* el aislamiento y la caracterización inicial de *Dehalococcoides ethenogenes* cepa 195. Se trata de una bacteria anaeróbica, de tamaño reducido (0,3 a 0,8 µm) y forma cocoidea, que carece de peptidoglicano en su pared celular, lo que la hace resistente a la ampicilina y otros antibióticos. La parte exterior de la bacteria está recubierta de una capa contigua formada por proteínas globulares (capa *S*). Requiere acetato (fuente de carbono), vitamina B12, hidrógeno (fuente de electrones) y otros nutrientes. La posición filogenética de *Dehalococcoides ethenogenes* cepa 195, basada en la secuencia de su 16*S* ADNr, indica que es una eubacteria muy distinta de los otros 4000 tipos bacterianos conocidos. Por múltiples razones, nos encontramos ante una bacteria insólita.



Dehalococcoides ethenogenes *cepa 195. Aislada por microbiólogos de la Universidad de Cornell, en una de las primeras imágenes obtenidas de un corte celular a través del microscopio electrónico*

Desde 1993 se habían venido aislando otras bacterias capaces de detoxificar cloroetenos. Pero sólo efectuaban una degradación parcial, ya que producían isómeros del dicloroetileno, que todavía contienen dos átomos de cloro.

El aislamiento de *Dehalococcoides ethenogenes* cepa 195 abre nuevas expectativas y proporciona nuevas esperanzas en el campo de la biodetoxificación de cloroetenos. Aunque la comprensión y posterior aplicación de un fenómeno tan complejo como la biodescontaminación requiere el esfuerzo conjunto de varias disciplinas, el estudio de los microorganismos responsables del proceso es fundamental. Deben desentrañarse el tipo de microorganismo, sus requerimientos nutritivos, las condiciones óptimas de degradación, su fisiología y enzimología y la posible formación de productos no deseables.

El estudio de *Dehalococcoides ethenogenes* cepa 195, lo mismo *in vitro* que en la naturaleza (en suelos y aguas contaminadas), ayudará a entender los factores necesarios para efectuar, con éxito, la apremiante biodescontaminación de cloroetenos en el medio ambiente.

Xavier Maymó Gatell
Universidad de Cornell

Estelas de navíos

Los rastros blancos de la imagen de la página siguiente recuerdan las estelas de condensación que dejan los aviones en un cielo despejado. En esta fotografía infrarroja de la costa californiana tomada por un satélite meteorológico (a la longitud de onda de 3,7 micrometros), las propiedades ópticas de las nubes situadas sobre el océano Pacífico se han modificado por partículas emitidas por las chimeneas de los barcos. La fotografía permite el seguimiento de los navíos por el rastro que dejan.

Hemos añadido falsos colores a la imagen original: marrón para las masas continentales y azul para el océano. Las zonas oscuras corresponden a las regiones de cielo claro, y las zonas blanquecinas indican la presencia de nubes, bancos de estratocúmulos, frecuentes en esta región oceánica. Cuanto mayor es la reflectancia de la nube a la radiación solar en la longitud de onda de observación, más brillante se presenta.

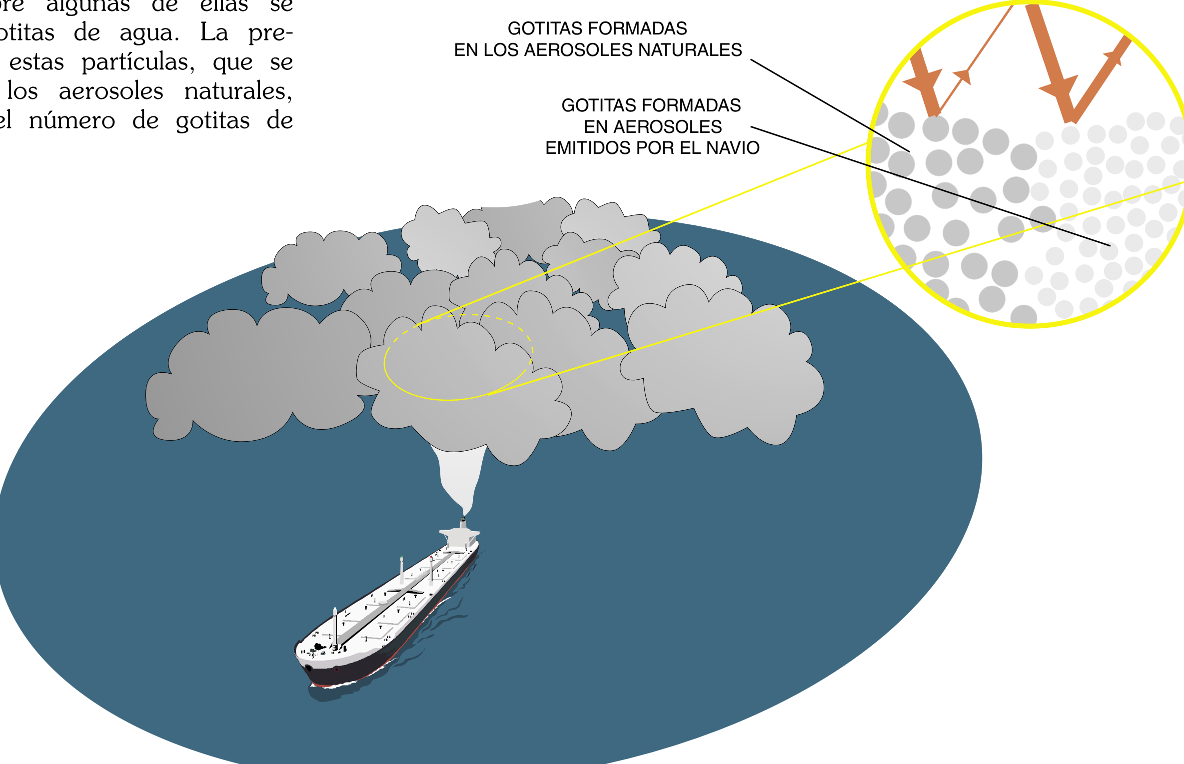
Los motores de los barcos, como todos los de combustión, emiten partículas, que suelen recibir el nombre de aerosoles. Cuando estas partículas penetran en una nube, sobre algunas de ellas se forman gotitas de agua. La presencia de estas partículas, que se suman a los aerosoles naturales, aumenta el número de gotitas de la nube. Dado que la cantidad de agua permanece constante, el tamaño medio de las gotitas disminuye y su superficie total aumenta. De acuerdo con las medidas tomadas *in situ* desde aviones, el diámetro de las gotitas varía desde unos 10 micrometros en un estratocúmulo a unos 7 micrometros de la estela de un barco.

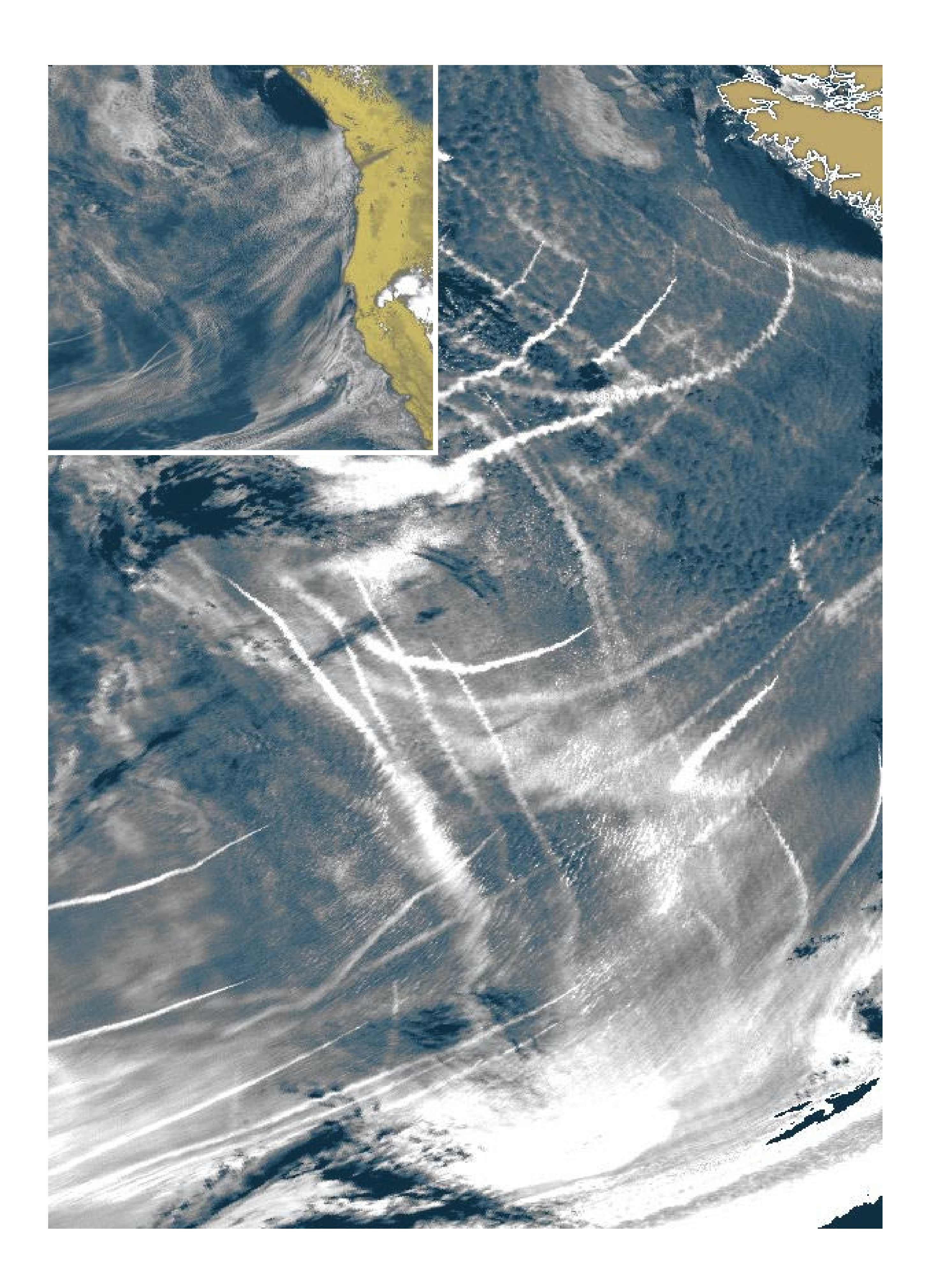
A las longitudes de onda de la radiación visible (*recuadro de arriba a la izquierda, fotografía a 0,63 micrometros*) el aumento de la superficie de las gotitas aumenta la difusión de la radiación solar por la nube: ésta se vuelve más brillante. Este fenómeno queda a veces enmascarado por las variaciones de brillo de la reflectancia de las nubes, ligadas a las variaciones de su espesor.

A la longitud de onda de 3,7 micrometros, el agua absorbe muy bien la radiación. Cuando el tamaño de las gotitas disminuye y su número aumenta, siendo constante la cantidad de agua, la absorción total aumenta, pero menos rápidamente que la difusión: el contraste con las regiones circundantes es, pues, más acusado que a la longitud de onda de 0,63 micrometros, y las estelas de los barcos resultan mucho más visibles en el infrarrojo.

La observación de estas estelas de navíos nos hace suponer un efecto similar, pero a mayor escala, asociado a los aerosoles de origen industrial (sulfatos y aerosoles carbonados): el aumento de la reflexión de la radiación solar por las nubes bajas de los continentes y de los océanos adyacentes. Este fenómeno tendería a enfriar el sistema climático. ¿Sería suficiente para compensar el aumento artificial del efecto invernadero resultante de la emisión de gases como el dióxido de carbono o el metano, consecuencia de la actividad humana? Probablemente no, pues los gases de efecto invernadero residen en la atmósfera durante varias decenas de años, mientras que los aerosoles desaparecen en una decena de días. Los primeros "se acumulan" en la atmósfera, mientras que la concentración de aerosoles industriales se mantiene proporcional a los flujos emitidos.

OLIVIER BOUCHER
Laboratorio de Optica Atmosférica.
Universidad de Lille I





Seguimiento y control de la chatarra espacial

El camino que conduce del Sputnik a la Estación Espacial Internacional está empedrado de una chatarra de lujo convertida en grave amenaza exterior

Nicholas L. Johnson

Desde que comenzara la era espacial hace cuarenta largos años, los cohetes han puesto en órbita más de 20.000 toneladas de material. Actualmente son 4500 las que aún permanecen allí en los casi 10.000 mil objetos "residentes espaciales", de los cuales sólo un cinco por ciento son naves operativas. Nos referimos a los cuerpos grandes, cuyas trayectorias pueden seguirse con radares militares y telescopios. Porque hay, además, millones de fragmentos menores, cuya pista se pierde y por los cuales se interesa cada vez más la industria espacial; éstos vagan dispersos por órbitas que distan de la superficie del planeta desde cientos de kilómetros hasta más de cuarenta mil.

Si esos diminutos acompañantes de la Tierra se movieran como lo hace el rebaño de lunas en miniatura que gira alrededor de Júpiter o Saturno, resultaría un espectáculo maravilloso. Los anillos de los planetas gigantes obedecen a una precisa coordinación; las rocas y los fragmentos de hielo que los forman describen órbitas ordenadas, y las colisiones entre ellos tienen lugar a velocidades pequeñas. Pero los satélites artificiales de la Tierra recuerdan más a un enjambre de abejas enojadas alrededor de una colmena, con sus movimientos en todas direcciones que parecen aleatorios. Con una densidad de satélites bastante baja, la región cercana a la Tierra es todavía un vacío según cualquier criterio terrestre. Pero los movimientos erráticos del enjambre hacen que las velocidades relativas sean enormes en las colisiones accidentales entre dos objetos. El choque con un guijarro de un centímetro de diámetro puede destruir una nave espacial. Un solo grano de arena de un milímetro de grosor podría arruinar una misión.

La basura extraterrestre adopta multitud de formas: naves espaciales inoperantes, cohetes abandonados, restos de lanzamientos y misiones, residuos de las fragmentaciones de satélites, partículas emitidas por los cohetes de combustible sólido, material de las superficies gastadas e incluso gotas procedentes de fugas de reactores nucleares.

Aunque ya se han lanzado más de 4800 naves, sólo unas 2400 continúan en órbita; las demás han vuelto a entrar en la atmósfera terrestre. De las naves supervivientes, el 75 por ciento han concluido sus misiones y están abandonadas. La mayoría tiene una masa entre un kilo y veinte toneladas; una notable excepción es la estación *Mir*, que pasa de las 115 toneladas. El más antiguo, y quizás uno de los menores, es el segundo satélite estadounidense, el *Vanguard 1*, lanzado el 17 de marzo de 1958, y que funcionó sólo seis años.

La mayoría de las misiones espaciales no sólo lanzan una nave espacial, sino que se van despojando de las fases vacías de los cohetes. El satélite meteorológico japonés, el *Himawari 3*, lanzado en 1984, se deshizo de tres: la primera en una órbita terrestre inferior, cuya altitud variaba entre 170 y 535 kilómetros; la segunda cerca del punto de destino del satélite, la órbita circular geosincrónica a 35.785 kilómetros, y la tercera en una órbita intermedia, muy elíptica, entre 175 y 36.720 kilómetros. Desde entonces ya han caído a la superficie terrestre dos de estos cuerpos, el primero en 1984 y el segundo en 1994. En 1998, sin embargo, todavía había en órbita 1500 fases, inútiles del todo.

Durante el primer cuarto de siglo de la era espacial, los ingenieros no prestaban mucha atención a las secuelas ambientales. Además de cohetes y naves, se abandonaban una multitud de pequeños componentes. Tuercas, abrazaderas y resortes salían despedidos cuando los satélites se libraban de los cohetes propulsores. Numerosas naves se desprendieron de las cubiertas de sensores o de dispositivos de control de altitud. Algunas misiones espaciales rusas dejaron más de 60 objetos en órbitas distintas. Quizá la mayor de todas esas piezas, con un diámetro de cuatro metros y una masa de 300 kilogramos, sea la parte superior de la misión de la Agencia Europea del Espacio SPELDA, un dispositivo utilizado para el lanzamiento de múltiples satélites por el *Ariane*.

Los vuelos espaciales tripulados han arrojado también su propia basura. En 1965, durante el primer paseo espacial de un americano, el astronauta del *Géminis 4* Edward White perdió un guante; cuando entró en su propia órbita a 28.000 kilómetros por hora se convirtió en la prenda más peligrosa que jamás hayan confeccionado (y usado) manos humanas. Más de 200 objetos, en su mayoría en forma de bolsas de basura, han salido a la deriva de la *Mir* durante su primera década en

NICHOLAS L. JOHNSON, experto de la NASA en residuos orbitales, trabaja en el Centro Espacial Johnson en Houston.



1. TORNILLOS, tuercas, abrazaderas y cables son algunos de los componentes de un cohete que ha estallado y vagan ahora por el espacio, según se recrea en esta interpretación artística. Con el tiempo esa chatarra menuda se irá dispersando. Los radares militares y los telescopios hacen un seguimiento de los fragmentos de mayor tamaño (*recuadro superior*). Los puntos blancos representan los objetos (no están a la misma escala que la Tierra).

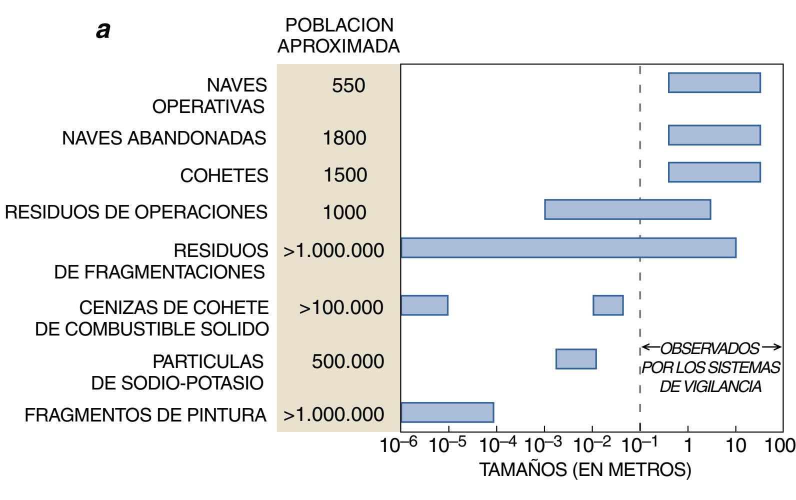
órbita. Por suerte, debido a que los astronautas mantienen órbitas bastante bajas —entre 250 y 500 kilómetros—, los objetos arrojados caen presto en la atmósfera y quedan abrasados al instante. El famoso guante cayó a la atmósfera un mes después.

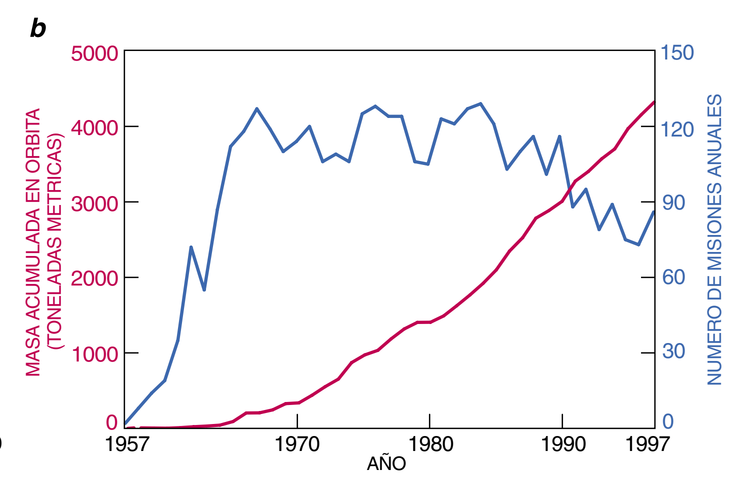
El mayor problema surge con las misiones autónomas a altitudes mayores, donde los restos permanecen. Se supone que superan el millar de objetos; entre ellos, 80 montones de agujas liberados en mayo de 1963 como parte de un experimento de telecomunicaciones realizado por el departamento de defensa estadounidense. La presión de radiación ejercida por la luz solar debía empujar los 400 millones de agujas fuera de órbita, pero un error al soltarlas hizo que se agruparan en órbitas que se elevan hasta seis mil kilómetros sobre la superficie terrestre.

La fuente por excelencia de la basura espacial mayor de 0,1 milímetros es la fragmentación de satélites y cohetes. Desde 1961, más de 150 satélites han estallado o se han partido, de forma accidental o deliberada, dispersando más de diez mil fragmentos cuyo tamaño permite observarlos desde tierra. Las fragmentaciones más nocivas desde el punto de visto ambiental han sido las explosiones de cohetes abandonados en cuyo interior aún había cierta cantidad de combustible. La detonación, causada por una excesiva presurización o por ignición del propulsante residual, lo mismo puede ocurrir enseguida, a las pocas horas tras el lanzamiento, que 23 años después; prácticamente todos los tipos de lanzadores son vulnerables.

La etapa superior de un cohete *Pegasus* lanzado en 1994 se desintegró el 3 de junio de 1996 y produjo la mayor nube de restos que se haya registrado: más de 700 objetos lo bastante grandes como para que se los pueda seguir en sus órbitas, trazadas de 250 a 2500 kilómetros sobre la Tierra. Este acontecimiento duplicó por sí solo el riesgo de colisión del Telescopio Espacial Hubble, que orbita tan sólo 25 kilómetros más abajo. Posteriores observaciones de radar descubrieron unos 300.000 fragmentos de más de cuatro milímetros, un tamaño suficiente para averiar cualquier nave espacial. Durante la segunda misión de mantenimiento del Hubble, en febrero de 1997, el transbordador espacial *Discovery* tuvo que realizar maniobras para alejarse de un fragmento del *Pegasus* que se calculó se le acercaría a menos de 1,5 kilómetros. Los astronautas también notaron abolladuras en los equipos del Hubble y una perforación en una de sus antenas, al parecer causada por colisión con algún residuo antes de 1993.

Hay cincuenta satélites que suponen una amenaza especial, pues contienen materiales radiactivos en sus reactores





2. LOS SATELITES ARTIFICIALES, entendiendo por tales cualquier objeto puesto en órbita, varían en tipo y tamaño, desde partículas de pintura de milésima de milímetro hasta la estación espacial *Mir*, de 30 metros de longitud (*a*). Hoy se lanzan menos misiones espaciales que en el pasado, pero la masa acumulada de satélites sigue creciendo porque las naves modernas son mayores (*b*). Los sistemas de vigilancia militar sólo captan los satélites que midan entre 10 centímetros y un metro (dependiendo de la órbita), cuyo número se ha ido incrementando cada año salvo en los de mayor actividad solar (*c*); su densidad presenta tres picos muy próximos, situados a altitudes de 850, 1000 y 1500 kilómetros, y otros menores en las órbitas semisincrónicas (20.000 kilómetros) y geosincrónicas (36.000 kilómetros), porque ésos son los destinos más frecuentes (*d*).

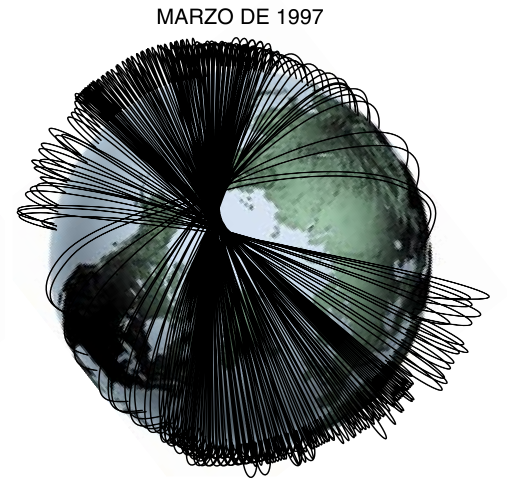
nucleares o generadores termoeléctricos radioisotópicos. En 1978, *Kosmos 954*, un satélite nuclear soviético, se estrelló accidentalmente en el norte de Canadá con 30 kilogramos de uranio enriquecido a bordo. Más tarde, los ingenieros soviéticos diseñaron las naves espaciales de modo que arrojasen los núcleos de combustible nuclear al finalizar sus misiones; así se quemaban al entrar en la atmósfera y no caían al suelo de golpe, como un solo cuerpo.

Este programa se cerró en 1988 y desde entonces no se han enviado al espacio reactores nucleares, pero el problema no ha desaparecido. Durante un experimento subvencionado por la NASA en 1989, el radar *Goldstone* del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, detectó una gran nube de gotas de sodio y potasio (líquido refrigerante perdido por un reactor en la expulsión de su núcleo de combustible). Observaciones posteriores realizadas por el radar *Haystack* del Instituto de Tecnología de Massachusetts confirmaron la existencia de un ingente número de esferas de sodio y potasio (quizás unas 70.000), cada una de alrededor de un centímetro de diámetro, a una altura de 900 kilómetros.

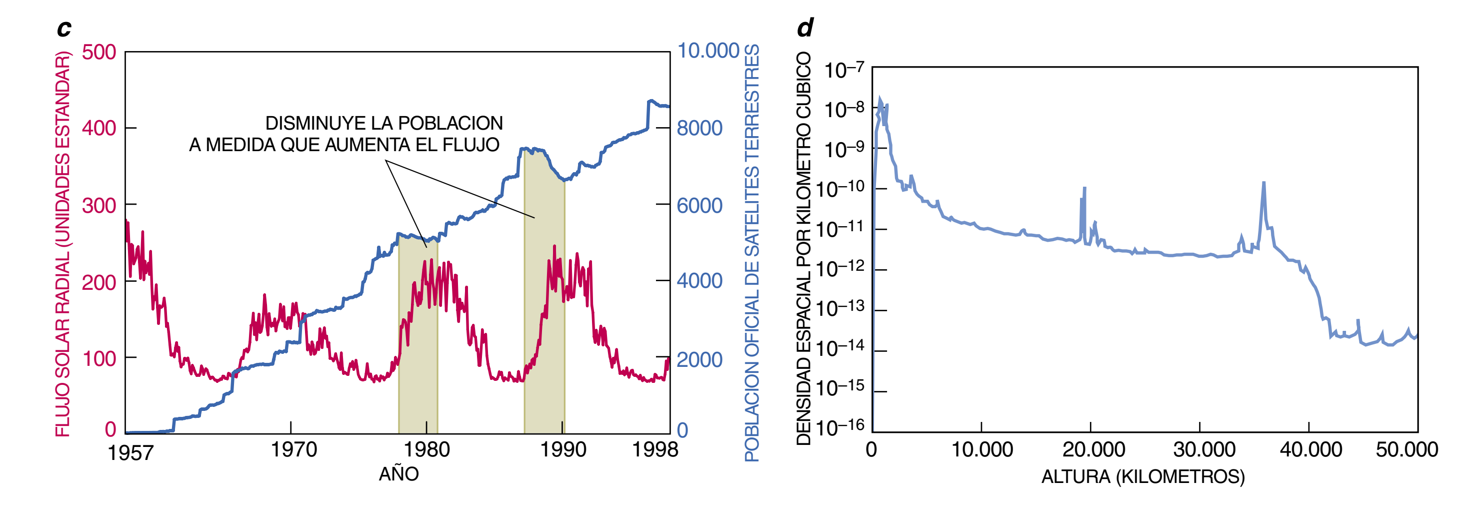
Los objetos de menos de 0,1 milímetros no son tan peligrosos como los de mayores dimensiones. Entre los restos de este tipo, predominan las emisiones de combustible sólido. Incluso cuando funcionan bien, los motores producen un número colosal de partículas (hasta 10^{20}) de óxido







3. LAS ORBITAS DE LOS RESIDUOS se dispersan poco después de la fragmentación de un satélite. A las tres semanas del estallido, en junio de 1996, del cohete *Pegasus* la chatarra permanecía concentrada en una banda estrecha (*izquierda*). Tres meses más tarde, la ligera asimetría del campo gravitatorio de la Tierra empezaba a intensificar las diferencias en las órbitas iniciales (*centro*). Pasados nueve meses, la chatarra andaba dispersa sin orden ni concierto (*derecha*). Además, aunque no se ilustra aquí, los objetos describían inicialmente órbitas como un todo, pero poco a poco perdieron la sincronización. Los expertos en chatarra espacial habrán de tener en cuenta este proceso cuando evalúen el riesgo que pueda correr el transbordador; al principio tendría que evitar los residuos concentrados, luego habría que evaluar estadísticamente el riesgo de impacto desde diferentes direcciones.



de aluminio de un tamaño del orden de una micra, además de cenizas de hasta un centímetro de grosor. Pese a haber descendido el uso de cohetes de combustible sólido durante los últimos diez años, la cantidad total de restos que generan anualmente ha crecido porque las naves espaciales modernas, más pesadas, necesitan motores mayores, con emisiones, por tanto, mayores también.

Las pequeñas partículas en órbita son consecuencia de la degradación natural, a largo plazo, de los materiales de los que están fabricadas las naves espaciales. Millones de diminutas partículas de pintura yacen en el espacio cercano a la Tierra. Los científicos han descubierto que existen estelas de ínfimas escamas de pintura que acompañan a muchas, por no decir a todas, las viejas naves espaciales y cohetes. (Debido a sus movimientos orbitales relativos, estas estelas preceden, no siguen, a la nave: a medida que los restos caen hacia la Tierra, aumenta su velocidad.) La mayoría de los detritos son invisibles para los detectores lejanos, aunque de forma ocasional sí se observan fragmentos respetables de los recubrimientos térmicos y los componentes hechos a partir del carbono. El Explorador del Fondo Cósmico, un satélite de la NASA, ha arrojado al menos 80 objetos.

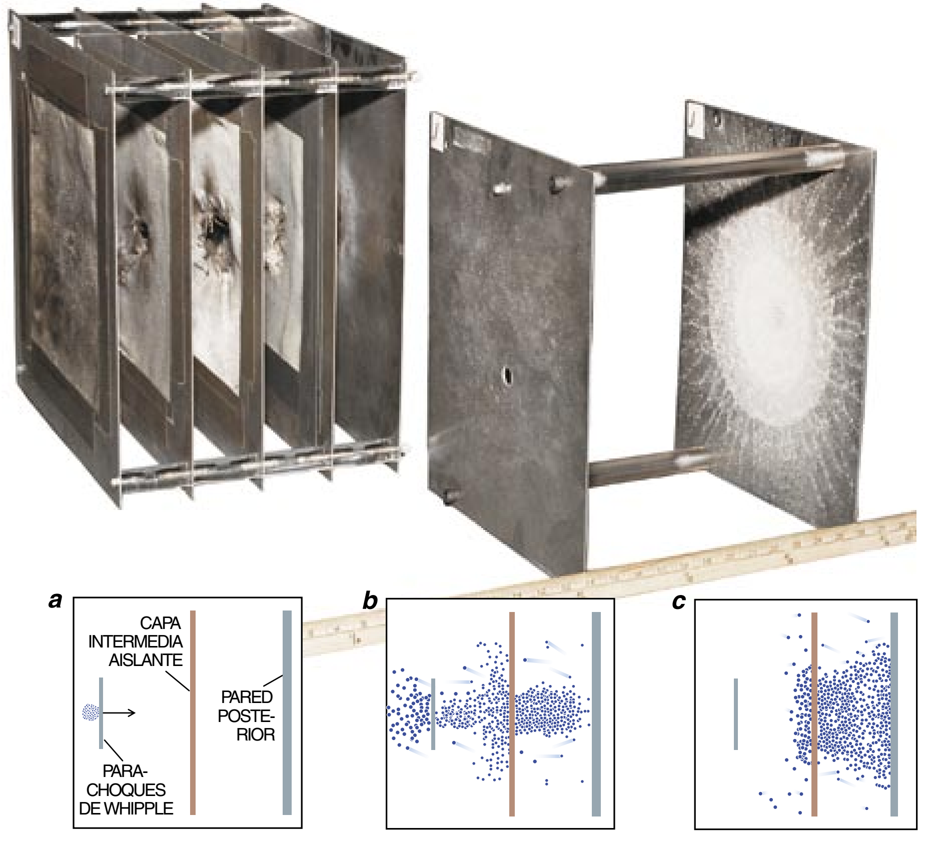
Pese a que algunos futuristas de los años sesenta y setenta hicieron conjeturas acerca del creciente número de objetos en órbita, hasta principios de los ochenta no nació una disciplina para estudiar el tema. La NASA evaluó en 1966 el peligro de colisión orbital para los vuelos espaciales tripulados, pero sus cálculos sólo tuvieron en cuenta los objetos susceptibles de detección. No existían medios, en aquel entonces, para discernir el número de partículas de menor tamaño.

La trayectoria de las piezas mayores de la chatarra espacial se halla sujeta a constante observación por medio de los mismos sistemas de seguimiento que las superpotencias construyeron durante la guerra fría para vigilar los ataques de los misiles y los satélites espía del enemigo. La Red de Vigilancia del Espacio, en EE.UU., y el Sistema de Vigilancia Espacial, de la antigua Unión Soviética, mantienen un catálogo oficial que se compone de unos diez mil "residentes espaciales". Cincuenta sensores ópticos, electro-ópticos y de radar realizan en promedio 150.000 observaciones diarias para seguir la posición de estos objetos. Están capacitados para detectar fragmentos de 10 centímetros a alturas menores y de un metro de tamaño a altitudes geosincrónicas.

La densidad espacial de esos residuos depende de la altitud, y sus picos están cerca de los 850, 1000 y 1500 kilómetros. A estas alturas el promedio es de un objeto cada 100 millones de kilómetros cúbicos. Por encima de los 1500 kilómetros, la densidad decrece con la altitud, salvo por unos empinados picos cerca de las altitudes semisincrónicas (20.000 kilómetros) y geosincrónicas (36.000). Semejante acumulación en determinadas órbitas refleja la concepción de las distintas familias de satélites y cohetes. La chatarra gruesa es de los satélites; por eso, adquiere su mayor densidad donde suelen ir a parar, con el correspondiente peligro para las naves operativas.

Los cuerpos de menos de 10 centímetros escapan a los sistemas que siguen a los satélites. Demasiado débiles para que puedan detectarse en los telescopios y demasiado pequeños para la longitud de onda de radar que utilizan los sistemas de vigilancia. Hasta 1984 no se habían observado los objetos de ese tamaño. Desde entonces se calcula su número por medio de un muestreo estadístico del cielo a lo largo de centenares de horas cada año. Para ello se han empleado el radar *Goldstone*, un radiotelescopio alemán y la enorme antena de Arecibo, en Puerto Rico, en modo biestático (transmitiendo señales de una parabólica y recibiendo reflexiones del satélite en una antena cercana); así se detectan objetos incluso de dos milímetros. Los radares *Haystack* y *Haystack Auxiliar*, que participan en un proyecto conjunto de la NASA y el departamento de Defensa, están preparados para la detección de objetos de parejas proporciones. Para calibrar los detectores de esos residuos minúsculos, el transbordador espacial desplegó en 1994 y 1995 unos "objetivos" especiales con forma de esferas y agujas.

El estudio de objetos aún menores exige inspeccionar las superficies golpeadas de las naves espaciales que los astronautas introducen en la bodega del transbordador y traen de vuelta a la Tierra. Entre 1984 y 1990, un experimento de la NASA, la Instalación Expuesta de Larga Duración, deliberadamente le puso la otra mejilla a la basura espacial; recibió el golpe de decenas de miles de fragmentos, además de los meteoroides procedentes de cometas y asteroides. Entre otras dianas inmóviles, cabe citar el *Transportador Europeo Recuperable*, la *Unidad Volante Espacial* japonés, algunos componentes del Hubble, la *Misión Máximo Solar* y, por supuesto, el propio transbordador espacial. Como el alcance de éste es limitado, la altitud de los objetivos debía ser de menos de 620 kilómetros. Para alturas superiores, los investigadores



4. UNAS PANTALLAS protegerán los componentes principales de la Estación Espacial Internacional de la mayoría de los objetos demasiado pequeños para ser detectados, pero lo bastante grandes como para perforar las paredes de la estructura. Estas pantallas son barreras montadas en la nave. El objeto se encuentra primero con una lámina de aluminio (generalmente de dos milímetros de grosor), el parachoques de *Whipple*, que hace que el proyectil se despedace (*a*). La velocidad de los fragmentos va disminuyendo a medida que atraviesan una o varias capas de kevlar (*b*). Los fragmentos acaban por rebotar en la pared de la nave (*c*).

no tienen más remedio que fiarse de los modelos teóricos. Dada la corta vida orbital a altitudes bajas de las partículas pequeñas, se deduce que abundan a altitudes superiores.

Para concluir, se calcula que existen más de 100.000 objetos entre 1 y 10 centímetros de diámetro en la órbita terrestre, además de decenas de millones entre un milímetro y un centímetro. En estos tamaños, y mayores aún, los objetos artificiales superan con creces a los meteoroides naturales. Las poblaciones de meteoroides y residuos orbitales son similares entre los 0,01 y 1,0 milímetros; a tamaños aún menores vuelven a predominar los residuos orbitales.

A lo largo de los últimos 20 años, la población de satélites bajo vigilancia se ha visto incrementada a un ritmo medio de unos 175 objetos cada año, con un aumento global de un 70 por ciento. De más de un cuarto de este crecimiento tienen culpa los despedazamientos de satélites; el resto procede de nuevas misiones. Desde 1957 se han lanzado un promedio anual de 120 nuevos vehículos espaciales. Durante la última década, sin embargo, la actividad ha decaído. Se produjo un máximo en 1984, con 129 misiones, y una caída en picado en 1996, con 73, la cifra más baja desde 1963. El ritmo de lanzamientos se puso en 86 el año pasado, gracias a los diez lanzamientos de las nuevas constelaciones de satélites de comunicaciones (Iridium y Orbcom).

Gran parte del declive general afecta a la antigua Unión Soviética. Rusia tenía 28 misiones espaciales en 1997, 21 con fines internos, siete de firmas comerciales extranjeras. Diez años antes la URSS lanzó 95 misiones, todas ellas para programas internos. Ahora bien, puesto que la reducción de la actividad espacial rusa se ha concentrado en los vuelos de baja altitud, semejante recorte ha tenido escasa repercusión en satélites a largo plazo.

Al otro lado de la ecuación, existen tres tipos de acciones para deshacerse de los satélites; a saber, los operadores pueden dirigirlos hacia la atmósfera, el transbordador puede sacarlos de órbita y, por fin, sus órbitas pueden caer en espiral de forma natural. Las dos primeras opciones, aunque ayudan, tienen un efecto global escaso, porque su aplicación se ciñe a objetos situados en órbitas inferiores, que, de todos modos, terminarían por desaparecer.

El tercer camino —el declive natural de la órbita— constituye la principal escoba para barrer la chatarra. Por más que imaginemos un espacio exterior desprovisto de aire, la verdad es que la atmósfera terrestre va desapareciendo con bastante lentitud. Todavía existe la suficiente resistencia de aire en la órbita terrestre inferior como para que las veloces naves espaciales no se olviden del fenómeno del rozamiento. Esta fuerza de resistencia se autorrefuerza: a medida que los satélites pierden energía por la resistencia, caen hacia adentro y aumenta su velocidad, lo cual incrementa la resistencia y la rapidez con la que pierden energía. Al final, atraviesan las partes más densas de la atmósfera y se desintegran parcial o totalmente en plena lengua de fuego.

Esa caída natural se acelera por debajo de los 600 kilómetros de altura, pero se percibe incluso a altitudes de hasta 1500 kilómetros. A alturas menores los satélites sólo duran algunos años, a no ser que pongan en funcionamiento sus cohetes para compensar el efecto de resistencia. Durante los períodos de emisiones solares de alta energía, que tienen un ciclo de once años, la atmósfera terrestre recibe más calor, se expande y crece la resistencia atmosférica. Cuando se produjo el último máximo solar (en 1989-1990), cayeron más satélites catalogados a la Tierra que nunca —tres al día, el triple del ritmo medio— barriendo de las órbitas más de 560 toneladas de material en sólo un año. La estación *Salyut 7*, predecesora de la *Mir*, fue víctima de esta actividad y penetró en la atmósfera a principios de 1991. El máximo solar anterior, entre 1979 y 1980, devolvió a tierra la estación espacial *Skylab* de EE.UU. antes de lo previsto. Por muy bienvenida que haya sido la recogida natural de basura, no ha impedido el crecimiento de la población total de satélites; la resistencia atmosférica es poco menos que nula para los que describen órbitas a mayor altura. Por ello no podemos confiar exclusivamente en los procesos naturales para solventar el problema de la chatarra.

Son varias y diversas las consecuencias que comporta el crecimiento de la población de satélites terrestres. El

transbordador espacial se ve en ocasiones obligado a efectuar maniobras para no chocar contra los grandes satélites abandonados; y por culpa de los impactos de las partículas de polvo hiperveloces, una de cada ocho de sus ventanas debe reemplazarse tras cada misión, en promedio. Cada vez se hace más imperioso calibrar el peligro de los impactos a la hora de escoger la orientación de vuelo del transbordador. Lo más probable es que los residuos golpeen el plano orbital de 30 a 45 grados a la izquierda y a la derecha de la dirección en que avanza. A menos que sea inexcusable, los astronautas procuran alejar de la dirección de peligro las partes más sensibles del transbordador.

En julio de 1996 se produjo la primera colisión reconocida oficialmente entre dos satélites catalogados. *Cerise*, satélite militar francés, quedó desarbolada cuando un fragmento procedente de un cohete europeo que había estallado diez años antes dio de lleno en el brazo del control de altitud, a una velocidad de casi quince kilómetros por segundo. Pese al golpe, la nave pudo continuar su misión tras los denodados esfuerzos de sus controladores.

Por desgracia, todas las naves espaciales son vulnerables a los objetos cuyo tamaño oscile entre uno y diez centímetros de tamaño, demasiado diminutos para los sistemas de vigilancia y suficientes para perforar las paredes del vehículo. El departamento de defensa norteamericano ha empezado a robustecer su red de vigilancia espacial de manera que cubra estos tamaños. Sin embargo, los sistemas están diseñados para los vuelos espaciales tripulados y ofrecen, por ende, poca protección a la mayoría de los satélites.

En su mayoría, las naves espaciales corren poco riesgo de impacto durante su vida útil. Se teme que en el futuro el entorno sea menos benigno. Aunque la colisión del *Cerise* no generó mucha chatarra, un choque de sus proporciones podría muy bien hacer saltar miles de fragmentos de tamaño suficiente para destrozar otros satélites, que a su vez generarían sus propios escombros, y así sucesivamente. Este fenómeno en cadena podría convertirse en característica predominante de la evolución a largo plazo de la población de satélites.

Para impedir que esta hipótesis se haga realidad, las naciones involucradas comenzaron hace diez años a sumar esfuerzos. En el comité de coordinación sobre residuos espaciales se sientan representantes de EE.UU., Rusia, China, Japón, India, la Agencia Europea del Espacio, Francia, Reino Unido y Alemania. En 1994 el subcomité científico y técnico para el uso pacífico del espacio exterior, de las Naciones Unidas, puso sobre la mesa el problema de la chatarra en órbita, cuya evaluación deberá estar lista en 1999. Aunque en estos momentos nadie duda de la magnitud del problema, los comités aún deben decidir cuál es el remedio idóneo, qué organismo tendría que actuar de "policía" en la materia y cómo lograr un equilibrio entre el riesgo de futuros daños y los costes de mitigar el problema y limpiar los residuos.

Mientras tanto, cada organismo nacional se esfuerza por generar menos basura. La NASA y la japonesa NASDA recogen en trampas las tuercas y emplean amarres especiales para limitar los residuos generados. Descargan el combustible sobrante y apagan los sistemas eléctricos a bordo de las naves inactivas para prevenir su destrucción; recomiendan, además, que se retiren de sus órbitas a los nuevos satélites de baja altitud y a las fases de cohetes ya utilizadas, para conducirlos hacia la atmósfera, donde acabarán incinerados antes de que transcurran 25 años del fin de su misión.

Tras la devastadora explosión del *Pegasus* en 1996, la empresa que se encargó del proyecto y operación del cohete, *Orbital Sciences Corporation*, volvió a diseñar la etapa superior e incorporó nuevas medidas preventivas antes del reinicio de las misiones, el mes de diciembre de 1997. Algunas de las nuevas redes telefónicas por satélite se proponen retirar de las órbitas a sus satélites en el momento de la "jubilación". A altitudes mayores, disminuye el riesgo de colisión, pero se plantea otro problema: la escasez de espacio en la órbita geosincrónica. Para evitar que los satélites inactivos ocupen el espacio que necesitan los que funcionan, se insta el entierro de las naves desechadas en "órbitas-cementerio" menos concurridas. En el mes de enero, el gobierno de los EE.UU. presentó a la industria aerospacial, para su examen, un borrador de los criterios que se establecerían para mitigar el problema de la basura espacial.

Pero no se acomete ninguna medida con la chatarra que se pasea ya por el espacio. Se pide a los ingenieros que incorporen medidas protectoras contra las colisiones, sobre todo las causadas por la masa innumerable de partículas inferiores al centímetro. Las pantallas —esto es, unas barreras externas— pueden proteger en buena medida los componentes de los satélites. No sólo aumentan la fiabilidad, sino que reducen también la cantidad de chatarra generada a raíz de un choque. La Estación Espacial Internacional estará equipada con pantallas de técnica depurada que cubrirán los cubículos de habitación, las vías de combustible, los giroscopios de control y otras zonas delicadas. No cabe apantallar los paneles solares. Los ingenieros tendrán que admitir la gradual degradación de los mismos provocada por colisiones menores.

La limpieza de la chatarra existente sigue siendo un grave problema económico y técnico. La utilización del transbordador espacial para el rescate de los restos es peligrosa y poco práctica. La NASA y los departamentos de defensa y energía de los EE.UU. han estudiado el Proyecto Orión, que utilizaría rayos láser desde el suelo para desintegrar la chatarra menuda. Esos láseres evaporarían parte del material del satélite y los alejarían de su trayectoria hasta instalarlo en la atmósfera. Otros mecanismos están todavía en las mesas de diseño; se piensa incluso en globos inmensos de espuma; las partículas que penetrasen en su interior perderían energía y caerían a la Tierra antes.

Aunque las generaciones futuras logren remediar los fallos operativos del pasado, conviene ahora esforzarse por impedir el crecimiento incontrolado de satélites; nos va en ello la posibilidad de quedarnos sin espacio en el espacio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ORBITAL DEBRIS: A TECHNOLOGICAL ASSESSMENT. Comité de Residuos Espaciales, Junta de Aeronáutica e Ingeniería Espacial, Consejo Nacional de Investigación. National Academy Press, 1995.

PROTECTING THE SPACE STATION FROM METEOROIDS AND ORBITAL DEBRIS. Comité de Gestión del peligro de escombros orbitales y meteoroides para la Estación Espacial Internacional, Junta de Aeronáutica e Ingeniería Espacial, Consejo Nacional de Investigación, National Academy Press, 1997.

Un cuarto de siglo de matemáticas recreativas

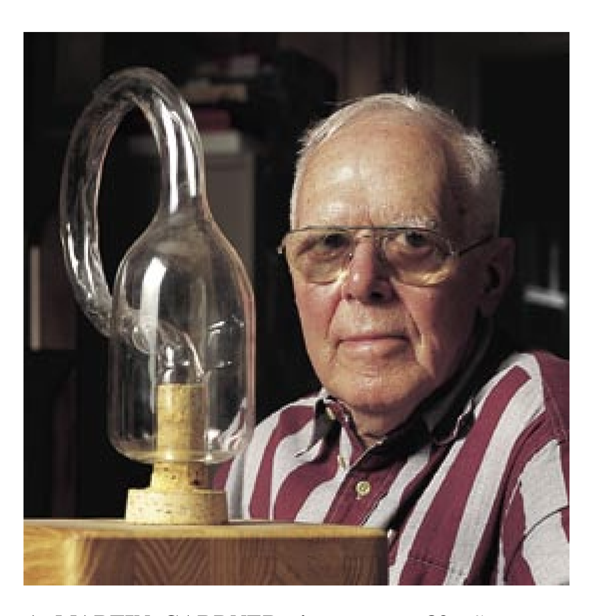
El creador de la sección "Juegos matemáticos" de Investigación y Ciencia *evoca 25 años de rompecabezas amenos y descubrimientos serios*

Martin Gardner

"La diversión es uno de los campos de la matemática aplicada."

—William F. White,
A Scrapbook of Elementary Mathematics

Mi colaboración regular con *Scientific American* comenzó en el número de diciembre de 1956 con un artículo sobre hexaflexágonos. Estas curiosas estructuras, que resultan de plegar en forma de hexágono una tira ordinaria de papel, y pegar después los extremos, podía volverse del revés las veces que se quisiera, revelando al hacerlo una o más caras ocultas. Fueron ideadas por un grupo de graduados de Princeton en 1939. El juego con hexaflexágonos resulta entretenido, pero tal vez lo importante sea que revelan el vínculo entre los problemas de las matemáticas recreativas y las matemáticas "serias". Estaba entre sus inventores Richard Feynman, quien, andando el tiempo, llegaría a ser uno de los físicos teóricos más famosos del siglo.



1. MARTIN GARDNER sigue, a sus 83 años, ocupándose de problemas matemáticos. Posa aquí ante una botella de Klein, objeto que tiene solamente una superficie: el interior y el exterior de la botella están conectados sin solución de continuidad.

En la época en que empecé con mi sección, se podían contar con los dedos de la mano los libros de matemática recreativa. Recordaré la obra clásica del género —*Mathematical Recreations and Essays*, escrito en 1892 por W. W. Rouse Ball— en una versión puesta al día por otra figura legendaria, H. S. M. Coxeter. Dover Publications había lanzado una traducción al inglés de *La Mathématique des Jeux*, de Maurice Kraitchik, un experto en teoría de números. Pero, amén de un par de colecciones de rompecabezas más, eso era todo.

Desde entonces, se ha producido una avalancha de libros de matemáticas recreativas; muchos, obra de matemáticos distinguidos. Merecen citarse Ian Stewart, actual responsable de la sección de "Juegos matemáticos" de *Investigación y Ciencia*; John H. Conway, de la Universidad de Princeton; Richard K. Guy, de la de Calgary, y Elwyn R. Berlekamp, de la de California en Berkeley. También pueden verse, cada vez con mayor frecuencia, artículos de esa índole en las revistas de matemáticas. El *Journal of Recreational Mathematics*, trimestral, empezó su andadura en 1968.

La divisoria entre la matemática para entretenimiento y la matemática seria es difusa. Muchos profesionales consideran su trabajo como una forma de juego, como podrían decir las estrellas del baloncesto. En general, se considera que un problema matemático es de naturaleza recreativa si contiene un aspecto lúdico que pueda ser comprendido y apreciado por no matemáticos. En las matemáticas recreativas se cuentan problemas elementales de soluciones elegantes y, muchas veces, sorprendentes. También caben en ellas las paradojas desconcertantes, los juegos de ingenio, ciertos trucos de magia o curiosidades topológicas como las bandas de Möbius o las botellas de Klein. De hecho, en casi todas las ramas de las matemáticas que no requieran del cálculo diferencial hay áreas que pudiéranse juzgar recreativas.

Mathematics Teacher, revista mensual publicada por el norteamericano Consejo Nacional de Profesores de Matemáticas (NCTM), suele traer artículos sobre temas recreativos. La mayoría de los docentes, sin embargo, siguen haciendo caso omiso de ese material. Durante 40 años me he esforzado por convencer a los educadores de la necesidad de incorporar las matemáticas recreativas en los programas. Introducidas con regularidad, podrían servir para interesar a los niños y los adolescentes en las maravillas de las matemáticas.

He referido con frecuencia una anécdota de mis años de alumno de secundaria, que ilustra la cuestión. Un

Cuatro problemas de Martin Gardner

(Soluciones en la última página del artículo)

1



Paco Tallador, un tahúr, pone tres cartas boca abajo sobre la mesa. Uno de los naipes es un as; las otras dos son figuras. Usted pone un dedo sobre una de las cartas, y apuesta a que esa carta es el as. La probabilidad de que haya usted elegido el as es, obviamente, $^{1}/_{3}$. Ahora Tallador alza un poco cada una de las cartas, y las mira discretamente. Dado que sólo hay un as entre las tres cartas, al menos una de las *no* elegidas tiene que ser una figura. Paco le da la vuelta a esa carta y se la muestra. ¿Qué probabilidad hay ahora de que la carta elegida por usted sea un as?

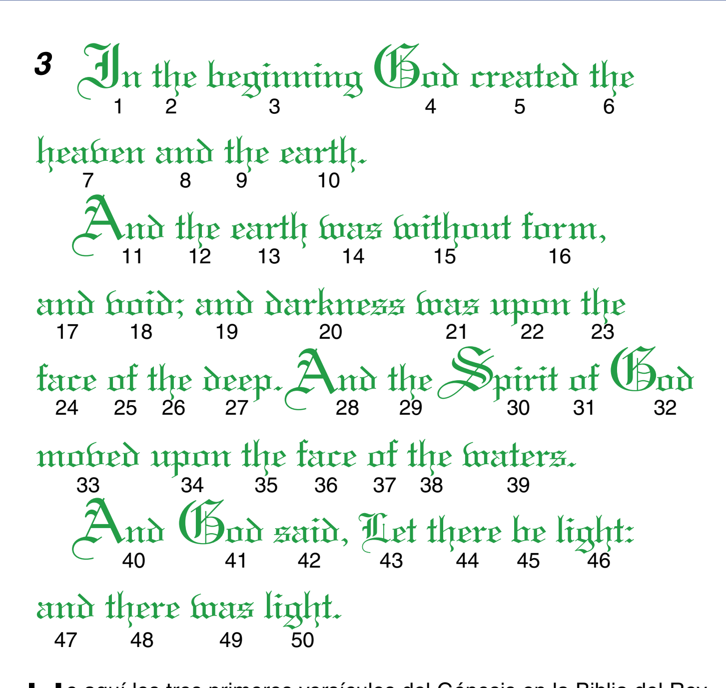
2

28	26	30	27	29	25
34	32	36	33	35	31
16	14	18	15	17	13
4	2	6	3	5	1
10	8	12	9	11	7
22	20	24	21	23	19

Esta matriz numérica es un cuadrado mágico de tipo muy curioso. Rodee con un círculo cualquiera de los números de la matriz, y tache después todos los números de la misma fila y columna. A continuación, rodee con un círculo cualquiera de los números no elegidos, y vuelva a tachar la fila y la columna de ese número. Prosiga de igual modo hasta que haya señalado seis números.

Está claro que cada número ha sido seleccionado al azar. Pero independientemente de los números que se elijan, su suma es siempre la misma. ¿Cuánto vale esta suma? Y lo que es más importante, ¿por qué funciona siempre el truco?

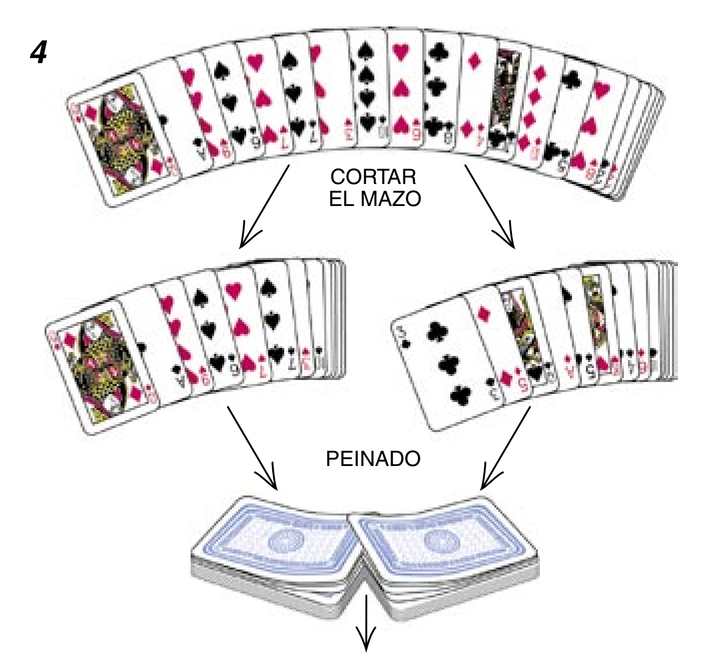
3



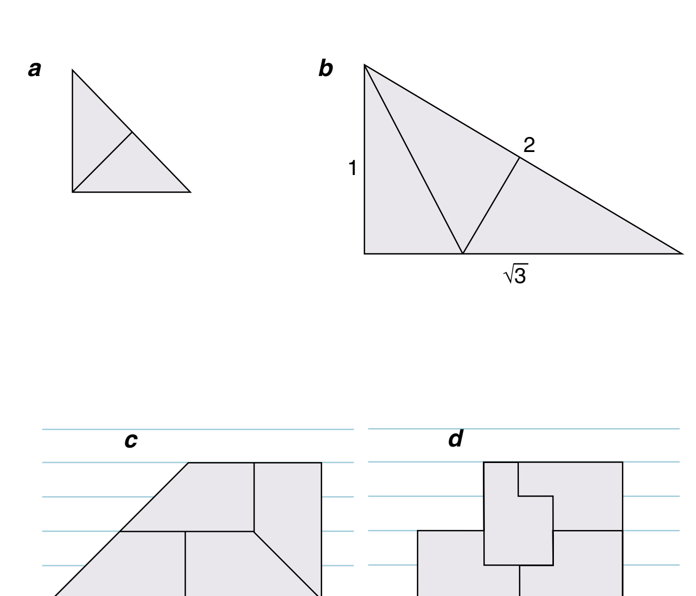
He aquí los tres primeros versículos del Génesis en la Biblia del Rey Jacobo. Seleccionemos una cualquiera de las 10 primeras palabras del primer versículo: “In the beginning God created the heaven and the earth.” Contemos el número de letras de la palabra elegida; sea *x* este número. Vayamos después a la palabra situada *x* palabras por delante. (Por ejemplo, si ha elegido usted la palabra “in”, ha de ir a “beginning.”) Contemos ahora el número de letras de esta palabra —llamémoslo *n*— y avancemos otras *n* palabras. Se continúa de igual manera hasta que la cadena de palabras llegue al tercer versículo del Génesis.

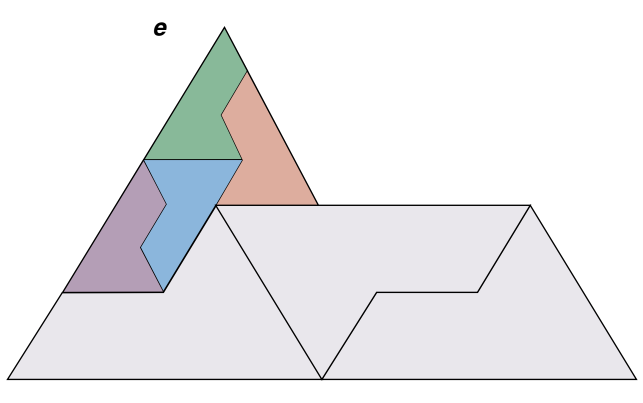
¿En qué palabra acaba la cuenta? ¿Será la respuesta una casualidad o formará parte de un plan divino?

4



Un ilusionista prepara una baraja francesa, donde las cartas rojas se vayan alternando con las negras. Corta el mazo más o menos por la mitad, asegurándose de que las cartas situadas en lo bajo de cada mitad no sean del mismo color. Nos permite entonces que barajemos, “peinándolas”, las dos mitades, tan cuidadosamente o tan descuidadamente como queramos. Hecho esto, el ilusionista toma las dos primeras cartas de lo alto del mazo. Una de las cartas es roja, la otra negra (no necesariamente en ese orden). Las dos siguientes también son una carta roja y una negra. De hecho, en cada uno de los sucesivos pares de cartas habrá una de cada color. ¿Cómo lo consigue? ¿Por qué no se crea una secuencia aleatoria al peinar las cartas?





2. LOS REP-TILES de orden bajo se acoplan entre sí para formar copias mayores de sí mismos. El triángulo rectángulo isósceles (*a*) es una figura rep-2, porque dos de tales triángulos forman un triángulo mayor que tiene la misma forma. Un triángulo de tipo rep-3 (*b*) es el que posee ángulos de 30, 60 y 90 grados. Entre otros rep-tiles están un cuadrilátero rep-4 (*c*) y un hexágono rep-4 (*d*). La esfinge (*e*) es el único pentágono conocido de tipo rep-4.

día, en clase de matemáticas, habiendo terminado la tarea, saqué una hoja y traté de resolver un problema que me tenía intrigado: si el primer jugador de una partida de tres en raya puede ganar siempre, si aplica la estrategia correcta. Cuando la profesora me vio garrapateando cruces y ceros, me arrancó la hoja y me dijo: "Gardner, cuando esté usted en mi clase espero que trabaje en matemáticas, y en nada más."

El problema del tatetí hubiera sido un estupendo ejercicio. Abre una vía excelente para introducir a los alumnos en la matemática combinatoria, la teoría de juegos, la simetría y la probabilidad. Es, además, un juego con el que todos los estudiantes han experimentado. ¿Quién no ha jugado, de niño, al tres en raya? Sin embargo, pocos docentes conozco que hayan incluido tales juegos en sus lecciones.

Según el anuario del Colegio Profesional de Matemáticos del año 1997, la última tendencia en enseñanza es la "nueva matemática moderna", nombre con el que pretende ser distinguida de la "matemática moderna", que tan desastrosamente fracasó hace un par de decenios. El más moderno sistema de enseñanza consiste en dividir en pequeños grupos a los alumnos de la clase y proponerles la resolución de problemas mediante razonamiento cooperativo. "El aprendizaje interactivo", tal es su denominación, sustituye a la explicación del profesor. Aunque esta "nueva matemática moderna" posee algunos aspectos positivos, me sorprendió mucho ver que el anuario nada tuviera que decir sobre el valor de la matemática recreativa, cuyos problemas son casi perfectos para la resolución cooperativa.

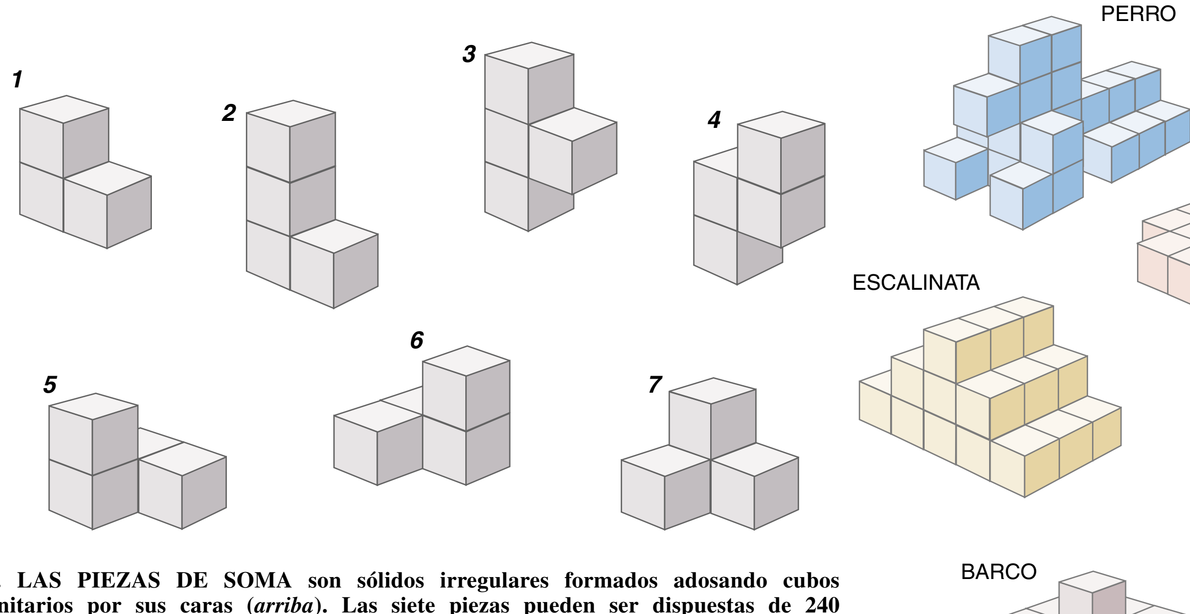
MARTIN GARDNER tuvo a su cargo largos años la sección "Juegos matemáticos" de *Investigación y Ciencia*. Autor de más de setenta libros, acaba de publicar *The Last Recreations*.

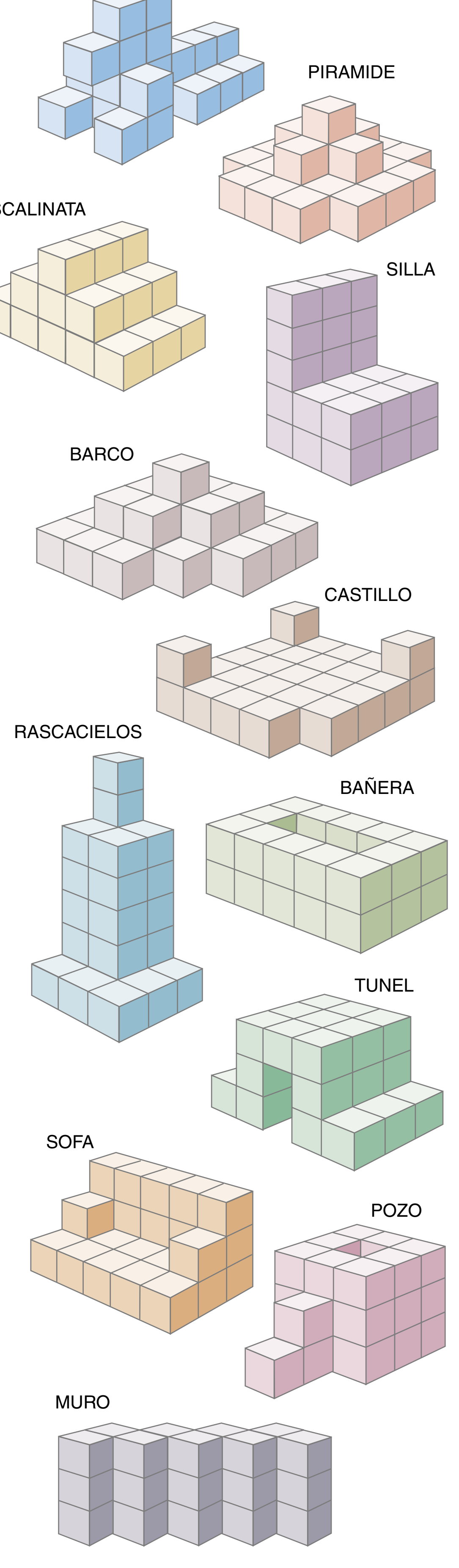
Séame permitido proponer a los docentes el siguiente experimento. Se pide a cada grupo de estudiantes que piense en un número de tres cifras; sea éste el número ABC. Deben después introducir esa secuencia dos veces en sus calculadoras, formando el número ABCABC. Por ejemplo, si el número pensado ha sido 237, deberían teclear 237237. Diga a los estudiantes que usted, por sus poderes psíquicos, puede predecir que al dividir el número por 13 no habrá resto. Tal predicción resultará cierta. Pídales ahora que dividan el cociente entre 11. Lo mismo que antes, no habrá resto. Indíqueles, por último, que dividan el número por 7. Y ¡hale hop!, en la pantalla de la calculadora aparecerá el número ABC primitivo. El truco tiene un secreto bien sencillo: $ABCABC = ABC \times 1001 = ABC \times 7 \times 11 \times 13$. (Como cualquier otro entero, podemos descomponer unívocamente el número 1001 en factores primos.) No conozco forma mejor de introducir a los estudiantes en la teoría de números y en las propiedades de los números primos que la explicación de por qué este truco funciona siempre.

Uno de los grandes placeres que me ha reportado la sección de *Juegos matemáticos* durante tantos años ha sido poder conocer a matemáticos de raza. Yo apenas soy más que un periodista que ama las matemáticas y que puede escribir sobre ellas con cierta soltura. No estudié exactas en la universidad. Conforme he ido aprendiendo, mis artículos han ido adquiriendo mayor vuelo matemático, pero la clave de la popularidad de la sección residía en el fascinante material que algunos de los mejores matemáticos del mundo tuvieron la bondad de proporcionarme.

Solomon W. Golomb, de la Universidad de California del Sur, fue uno de los primeros en traer grano al molino de la sección. En el número de mayo de 1957 presenté su estudio de los poliominós, figuras que se obtienen adosando cuadrados idénticos. El dominó —constituido por dos de tales cuadrados— tiene una sola forma, pero los trominós, tetrominós y pentominós pueden adoptar una variedad de formas: en L, en T, cuadrada, etc. Uno de los primeros problemas de Golomb consistía en determinar si un determinado conjunto de poliominós, perfectamente encajados, podría cubrir un tablero de ajedrez sin dejar ningún cuadrado al descubierto. El estudio de los poliominós se convirtió pronto en rama floreciente de las matemáticas recreativas. Arthur C. Clarke, el célebre autor de obras de ciencia-ficción, confesó que se había convertido en un "pentominadicto" cuando se puso a jugar con estas figuras, engañosamente sencillas.

También fue Golomb quien me hizo prestar atención a una clase de





3. LAS PIEZAS DE SOMA son sólidos irregulares formados adosando cubos unitarios por sus caras (*arriba*). Las siete piezas pueden ser dispuestas de 240 formas para construir el cubo Soma de 3 por 3 por 3. Las piezas pueden también ensamblarse para formar con ellas todas las estructuras representadas a la derecha, salvo una. ¿Sabría el lector determinar qué estructura es imposible de construir? Se da la respuesta en el último recuadro del artículo.

figuras a las que llamó "rep-tiles", polígonos idénticos que se acoplan perfectamente para formar réplicas mayores de sí mismas. Uno de los rep-tiles es la esfinge, un pentágono irregular cuya forma recuerda vagamente a la del clásico monumento egipcio. Al adosar debidamente cuatro esfinges idénticas resulta una esfinge mayor que tiene la misma forma que sus componentes. El patrón de los rep-tiles puede expandirse infinitamente: logran una teselación del plano, creando copias de sí mismas, siempre mayores.

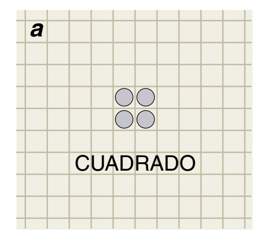
Piet Hein, ilustre inventor y poeta, ya fallecido, llegó a ser un buen amigo gracias a sus contribuciones a "Juegos matemáticos". En el número de julio de 1957 me ocupaba de un juego topológico inventado por él, llamado Hex, que se desarrolla en un tablero romboidal compuesto por hexágonos. Los jugadores sitúan sus fichas sobre los hexágonos y procuran, cada cual, ser el primero en completar una cadena ininterrumpida que vaya de uno a otro lado del tablero. (La forma hexagonal de las casillas ha dado pie a otros nombres, por asociación con los pavimentos de los cuartos de baño.)

Hein fue también el inventor del cubo Soma, del que me ocupé en diversas ocasiones. El cubo Soma se construye a partir de siete policubos diferentes, análogos en tres dimensiones de los poliominós. Los policubos se construyen adosando cubos idénticos por sus caras. Los policubos se pueden ensamblar para formar el cubo Soma —de 240 maneras, nada menos— amén de toda una panoplia de formas "somáticas": la pirámide, la bañera, el perro, etc.

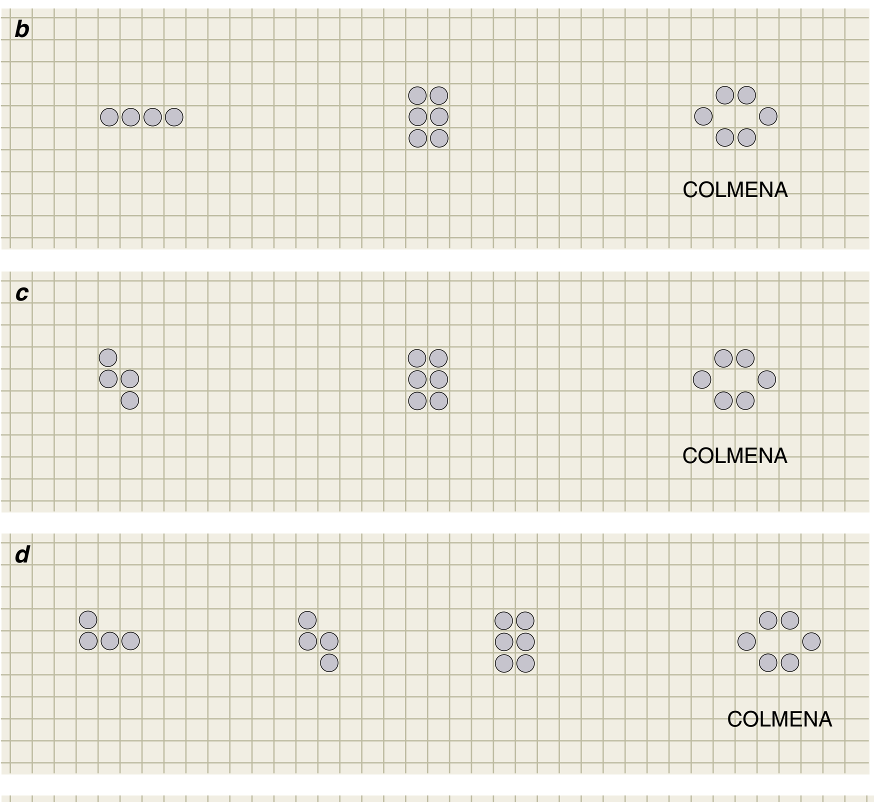
En 1970, el matemático John Conway vino a verme, y me preguntó si tenía un tablero de go, antiguo juego oriental. Lo tenía. Conway me hizo entonces una demostración de su hoy famoso juego de simulación llamado Vida. Colocó algunas piezas en la retícula del tablero, para ir después añadiendo o eliminando nuevas piezas de acuerdo con tres reglas sencillas: cada ficha que tiene dos o tres piezas vecinas sobrevive hasta la generación siguiente; cada ficha sin vecinas, con sólo una, así como las que tengan cuatro o más, se retiran: las primeras por inanición, las segundas, por asfixia; en cada espacio vacío con exactamente tres fichas adyacentes se añade una ficha nueva. Por aplicación reiterada de estas reglas se puede crear una asombrosa variedad de formas, entre ellas, algunas que se desplazan sobre el tablero, como si fueran insectos. Vida, que expuse en 1970, tuvo un enorme éxito entre los "cómputo-dependientes". A partir de ese momento, durante muchas semanas, las empresas y los laboratorios de investigación quedaron casi cerrados mientras los entusiastas de Vida experimentaban con formas de vida en las pantallas de sus ordenadores.

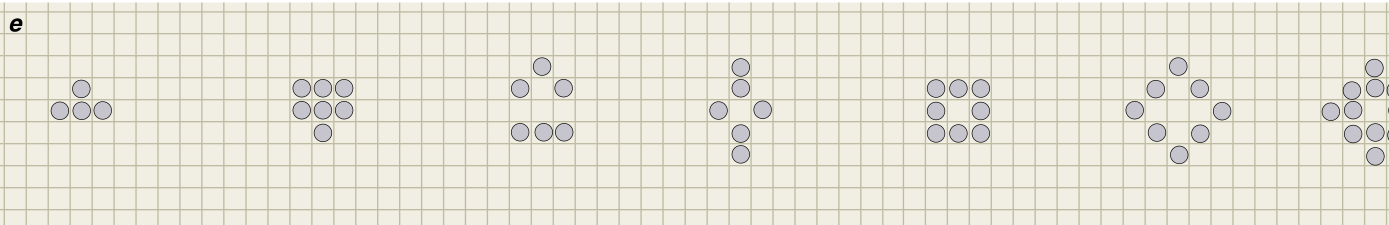
Conway colaboró más tarde con los matemáticos Richard Guy y Elwyn Berlekamp en la que estimo es la máxima contribución de este siglo a las matemáticas recreativas, una obra en dos volúmenes titulada *Winning Ways* (1982). Entre los cientos de gemas matemáticas que contiene destacaré un juego bipersonal llamado *Phutball* —"fúbola"— que también puede disputarse en un tablero de go. Situada la fúbola en el centro del tablero, los jugadores van colocando por turnos piezas en las intersecciones de la red de líneas. Los jugadores mueven la fúbola haciéndola saltar sobre las piezas, que son retiradas del tablero tras ser "sobresaltadas". El objetivo del juego es lograr que la fúbola rebase la línea de meta del bando opuesto, construyendo una cadena de fichas que vaya de lado a lado del tablero. A diferencia de lo que ocurre en las damas, el ajedrez, el go o el hex, en el juego de fúbola no se asignan piezas distintas a uno y otro bando: los participantes utilizan las mismas fichas para construir sus cadenas. Consiguientemente, cualquier jugada que realice uno puede ser repetida por su oponente.

Enriqueció la sección Frank Harary, hoy en la Universidad estatal de Nuevo México, que generalizó el juego de tres en raya. En la versión de Harary del juego, presentada en el número de junio de 1979 de *Investigación y Ciencia*, el objetivo no era formar una línea recta de "equis" o "ceros". Antes bien, los jugadores se esfuerzan en ser los primeros en disponer sus equis o sus ceros según un poliominó especificado de antemano, como una L o un cuadrado. Ronald L. Rivest, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, me permitió revelar —en el número de octubre de 1977 de *Investigación y Ciencia*— el sistema de "cifrado público" del que fue coinventor. Su sistema inauguró una serie de métodos de cifrado que han revolucionado el campo de la criptografía. Me cupo también el placer de presentar el arte matemático de Maurits C. Escher, así como la teselación no periódica descubierta por Roger Penrose, famoso por su trabajo sobre relatividad y los agujeros negros.



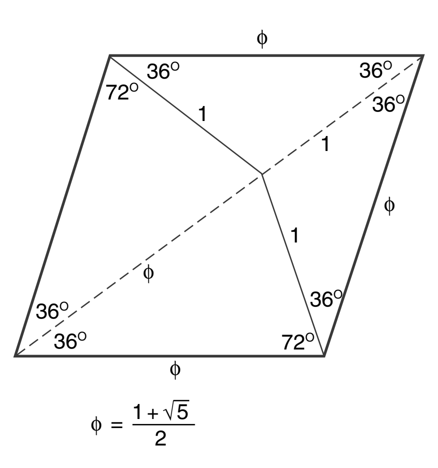
4. EN VIDA, un juego de simulación, diversas formas van evolucionando de acuerdo con las siguientes reglas, establecidas por John H. Conway. Si cuatro organismos están inicialmente dispuestos en un bloque cuadrado de casillas (*a*), la forma de Vida no cambia. Otros tres patrones iniciales (*b*, *c*, *d*) evolucionan hasta la forma estable "colmena". La quinta disposición (*e*) progresa hacia la figura oscilante "semáforo", que va alternando entre líneas verticales y horizontales.



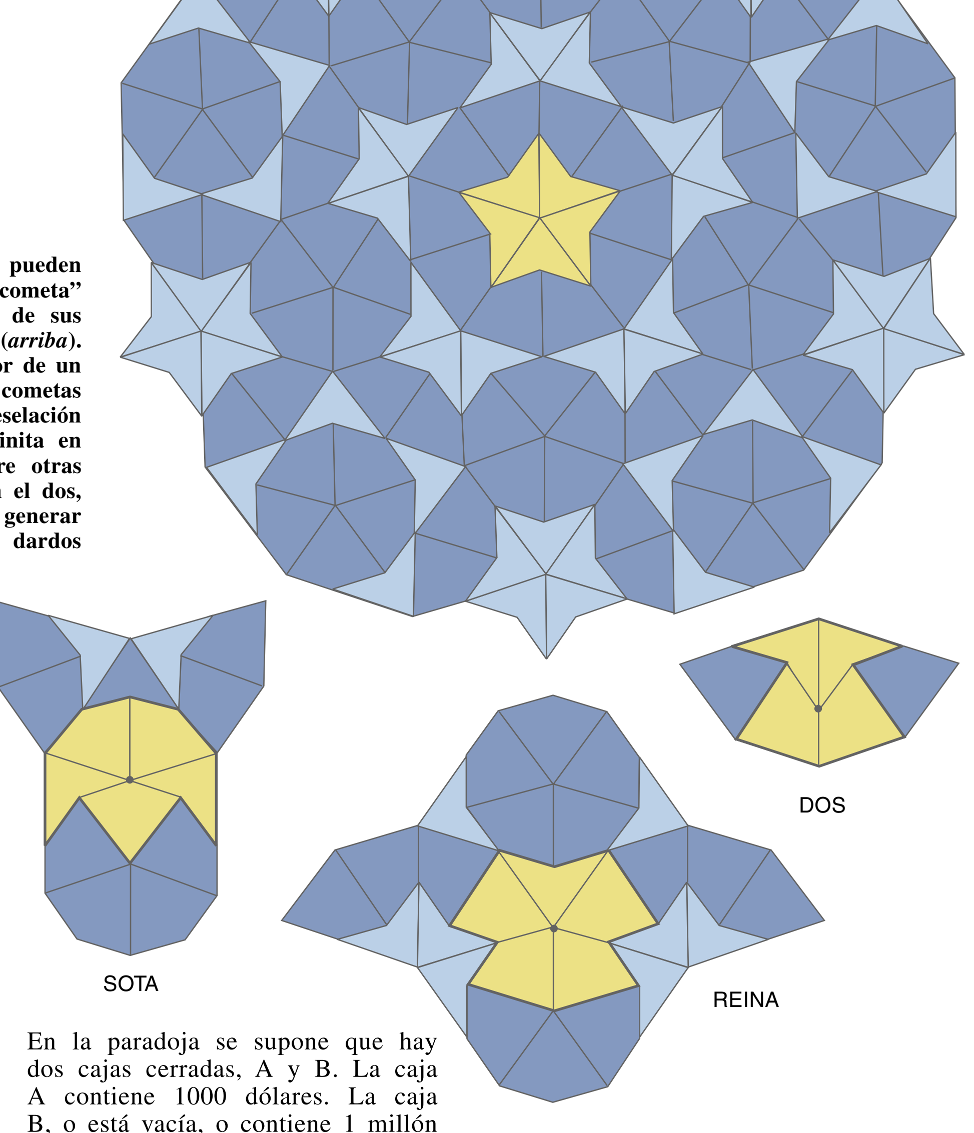


Hallamos en las teselas de Penrose un ejemplo maravilloso de cómo un descubrimiento realizado por el placer de hacerlo puede tener una utilidad práctica inesperada. Penrose ideó dos tipos de figuras, las "cometas" y los "dardos", que recubren el plano sólo de forma no periódica: ninguna parte fundamental de la configuración se repite. Expliqué la importancia del descubrimiento en el número de marzo de 1977 de *Investigación y Ciencia*, que exhibía una configuración de teselas de Penrose en la portada. Algunos años después, una variante tridimensional de la teselación de Penrose sirvió de base para la construcción de un tipo desconocido de estructura molecular denominada "cuasicristal". Desde entonces, los físicos han escrito cientos de artículos de investigación sobre los cuasicristales y sus excepcionales propiedades térmicas y vibratorias. Aunque la intención de Penrose fuera en principio estrictamente recreativa, sirvió para abrir el camino de una rama inédita de la física de estado sólido.

Los dos artículos que provocaron el máximo número de cartas fueron una "inocentada" y otro que dediqué a la paradoja de Newcomb. En el primero me ufanaba en poder dar cuenta de grandes avances en la ciencia y en las matemáticas. "Revelaba" allí la refutación de la



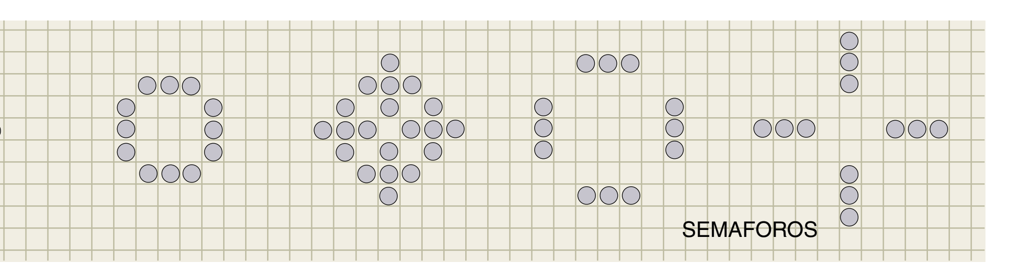
5. LAS TESELAS DE PENROSE se pueden construir dividiendo un rombo en una "cometa" y en un "dardo", tales que la razón de sus diagonales es la razón áurea, "phi" (ϕ) (*arriba*). Al disponer cinco de los dardos alrededor de un vértice se crea una estrella. Al colocar 10 cometas alrededor de la estrella, y extender la teselación simétricamente, se genera la pauta infinita en forma de estrella (*a la derecha*). Entre otras teselaciones en torno a un vértice están el dos, la sota y la reina, que también pueden generar configuraciones infinitas de cometas y dardos (*abajo, a la derecha*).



teoría de la relatividad y la invención de la cisterna de inodoro por Leonardo da Vinci. El artículo también anunciaba que, en ajedrez, la jugada de apertura "Peón 4 Torre Rey" permitía garantizar la victoria, y que el número *e*, elevado a $\pi \times \sqrt{163}$ era exactamente igual al entero 262.537.412.640.768.744. Para gran sorpresa mía, fueron miles los lectores que no se percataron de que el artículo era broma. El texto iba acompañado de un complejo mapa, del que yo aseguraba que hacía falta un mínimo de cinco colores para evitar que hubiera regiones vecinas del mismo color. Cientos de lectores me enviaron copias del mapa coloreadas con sólo cuatro tintas, confirmando así el teorema de los cuatro colores. Muchos aseguraron que la tarea les había llevado varios días.

La paradoja de Newcomb lleva el nombre del físico William A. Newcomb, quien dio origen a la idea, aunque fue descrita por primera vez en un artículo técnico por Robert Nozick, de la Universidad de Harvard. En la paradoja se supone que hay dos cajas cerradas, A y B. La caja A contiene 1000 dólares. La caja B, o está vacía, o contiene 1 millón de dólares. Hay dos opciones: elegir sólo la caja B o tomar ambas cajas. Parece evidente que lo mejor será tomar ambas cajas, pero existe un inconveniente: un ser superior —Dios, si así queremos llamarle— puede saber de antemano cuál será nuestra elección. Si predice que, por codicia, nos vamos a llevar ambas cajas, dejará vacía la caja B, y recibiremos sólo los 1000 dólares de A. En cambio, si predice que sólo elegiremos la caja B, coloca 1 millón de dólares en ella. Hemos observado este juego muchas veces, y siempre que alguien ha optado por ambas cajas, la caja B estaba vacía. Y en cada ocasión en que elegía sólo la caja B, se convertía en millonario.

¿Cuál ha de ser nuestra elección? A la vista de las muchas repeticiones presenciadas, se puede dar por hecho que el ser superior posee realmente el poder de efectuar predicciones seguras. Deberemos, por consiguiente, tomar sólo la caja B para asegurarnos la ganancia de 1 millón. Pero, ¡un momento! El ser superior hace su predicción *antes* de que nosotros juguemos.

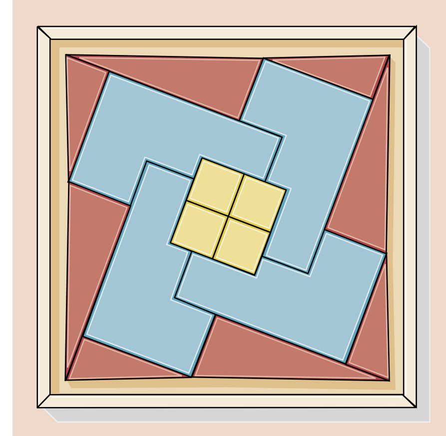


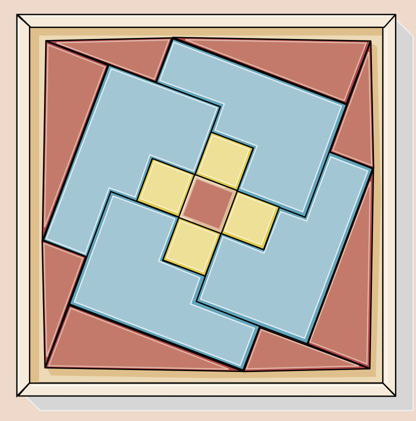
El misterio del área esfumada

Fijémonos en las figuras. Cada una de las configuraciones está formada con las mismas 16 piezas: cuatro triángulos rectángulos grandes, cuatro triángulos rectángulos pequeños, cuatro piezas de ocho lados cada una y cuatro cuadrados pequeños. Dispuestas según el patrón de la izquierda, las piezas encajan, pero al colocarlas a la derecha ¡queda un cuadrado vacío en el centro! ¿De dónde procede esta área suplementaria? ¿Y por qué desaparece en la colocación de la izquierda?

El secreto de esta paradoja —ideada por mí— será revelada en breve.

—M.G.





En el momento de elegir nosotros, la caja B está, o bien vacía, o bien contiene 1 millón de dólares. Si está vacía, al escoger la caja B no ganaremos nada. Si elegimos ambas cajas, obtendremos al menos los 1000 dólares de A. Y si B contiene el millón, logramos el millón más otros 1000 dólares. ¿Cómo se puede, pues, perder al elegir las dos cajas?

Los dos razonamientos parecen invulnerables. Sin embargo, no es posible que ambos sean la estrategia óptima. Nozick concluía que la paradoja, que pertenece a la teoría de decisión, sigue sin estar resuelta. Mi opinión personal es que la paradoja demuestra, por desembocar en una contradicción lógica, la imposibilidad de que un ser superior sea capaz de predecir las decisiones. Cuando me referí a la paradoja en un artículo, fueron tantas las cartas que recibí por su causa, que las metí en una caja y se las entregué personalmente a Nozick, quien las analizó en un artículo subsiguiente.

Los cuadrados mágicos han sido desde hace mucho una parte muy popular de las matemáticas recreativas. Lo que confiere a estos cuadrados su mágico carácter es la disposición de los números que contienen: los números de cada fila, columna y diagonal tienen la misma suma. Normalmente se exige que los números del cuadrado mágico sean todos distintos y vayan en orden consecutivo, empezando en 1. Existe solamente un cuadrado mágico de orden tres en el que situar los dígitos de 1 a 9 en una plantilla de 3×3. (Las variantes deducidas por giro o simetría se consideran triviales.) Existen, en cambio, 880 cuadrados mágicos de orden 4, y el número de disposiciones aumenta presto para órdenes mayores.

No es tal el caso de los hexágonos mágicos. En 1963, el correo me trajo un hexágono mágico de orden 3 ideado por Clifford W. Adams, un jubilado. Le envié el hexágono mágico a Charles W. Trigg, de la Universidad de Los Angeles, quien demostró que esta elegante disposición era el único hexágono mágico posible de orden 3, ¡y que no eran posibles hexágonos mágicos de ningún otro orden!

¿Y si no se exige que los números de cuadrado mágico vayan en orden consecutivo? Si el único requisito es que los números sean distintos, resulta posible construir una amplia variedad de cuadrados mágicos de orden 3. Por ejemplo, existe un número infinito de tales cuadrados que contienen números primos diferentes. ¿Podremos construir un cuadrado mágico de orden 3 cuyos nueve números sean cuadrados perfectos? Hace dos años, en un artículo de *Quantum*, ofrecí 100 dólares por una disposición así. Aunque nadie, hasta el momento, ha conseguido un "cuadrado de cuadrados", tampoco se ha demostrado su imposibilidad. De existir, sus números tendrían que ser muy grandes, tal vez más allá del alcance de las más modernas supercomputadoras. Es probable que semejante cuadrado mágico no llegue a tener ninguna utilidad práctica. ¿Por qué, entonces, están los matemáticos tratando de hallarlo? Porque podría existir.

Durante mis años en *Investigación y Ciencia* dedicaba, con regularidad casi anual, un artículo a una imaginaria entrevista con un numerólogo, a quién bauticé Dr. Irving Joshua Matrix (obsérvese el "666" correspondiente al número de letras de los nombres y el apellido). El buen doctor se explayaba sobre las propiedades insólitas de los números y sobre juegos de palabras extravagantes. Muchos lectores llegaron a creer que Matrix, y su hija medio japonesa, Iva Toshiyori, eran personas reales.

Lamento no haber podido preguntarle al Dr. Matrix qué opinión le merecía un libro, un absurdo éxito de ventas de 1997, titulado *The Bible Code*, que afirma encontrar profecías sobre el futuro en las disposiciones de las letras hebreas del Antiguo Testamento. El libro utiliza un sistema de cifrado que hubiera sido el orgullo de Matrix. Aplicando selectivamente este sistema a ciertos bloques de texto, los lectores curiosos pueden hallar predicciones ocultas no sólo en el Antiguo, sino en el Nuevo Testamento, en el Corán, el *Wall Street Journal*, e incluso en las propias páginas de *The Bible Code*.

La última vez que oí hablar del Dr. Matrix se encontraba en Hong Kong, investigando la aparición del número π en novelas famosas. Citaba, por ejemplo, el siguiente fragmento del capítulo noveno del libro segundo de *La guerra de los mundos*, de H. G. Wells: "For a time I stood regarding..." ¡Los números de letras de estas palabras dan las seis primeras cifras del número π!

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

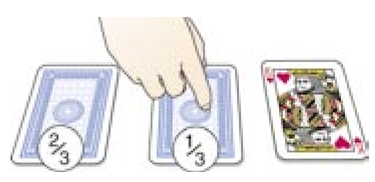
MATHEMATICAL RECREATIONS AND ESSAYS. 13.ª edición. W. W. Rouse Ball y H. S. M. Coxeter. Dover Publications, 1987.

PENGUIN EDITION OF CURIOUS AND INTERESTING GEOMETRY. David Wells. Penguin, 1991.

MAZES OF THE MIND. Clifford Pickover. St. Martin's Press, 1992.

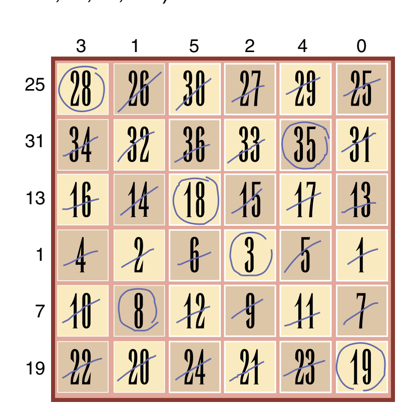
Soluciones de los cuatro problemas de Gardner

1. Casi todo el mundo supone que la probabilidad ha aumentado, pasando de $^1/_3$ a $^1/_2$. Después de todo, sólo quedan boca abajo dos cartas, y una tiene que ser el as. En realidad, la probabilidad sigue siendo $^1/_3$. La probabilidad de que la carta seleccionada no sea el as sigue siendo $^2/_3$, pero Tallador ha eliminado parte de la incertidumbre al mostrar que una de las dos cartas no elegidas no es el as. Así pues, hay una probabilidad de $^2/_3$ de que la otra carta no seleccionada sea el as. Si Tallador nos concede la oportunidad de cambiar nuestra apuesta a esa carta, deberíamos aceptarla (a menos, claro está, que esté guardándose cartas en la manga).



Expuse este problema de forma ligeramente diferente hace cuarenta años. En lugar de tres naipes, en el problema se hablaba de tres presos, uno de los cuales había sido indultado por el gobierno. En 1990, Marilyn vos Savant, autora de una columna muy popular en la revista *Parade*, presentó otra versión más de este problema, con tres puertas, tras una de las cuales se ocultaba un coche. Marilyn dio la solución correcta, pero recibió miles de cartas airadas —muchas de ellas, de matemáticos— ¡que la acusaban de ignorar la teoría de probabilidades! La controversia dio pie a una primera página en el *New York Times*.

2. La suma es 111. El truco funciona siempre, porque la matriz de números no es más que una tabla de sumar de las antiguamente usadas (*abajo*). La tabla está generada por dos conjuntos de números: (3, 1, 5, 2, 4, 0) y (25, 31, 13, 1, 7, 19). Cada uno de los números de la matriz es la suma de un par de números de los dos conjuntos. Al elegir los seis números rodeados por círculos, lo que se está haciendo es seleccionar seis pares que contienen a la totalidad de los 12 números generadores. Así pues, la suma de los números rodeados es siempre igual a la suma de los 12 números generadores.



	3	1	5	2	4	0
25	28	26	30	27	29	25
31	34	32	36	33	35	31
13	16	14	18	15	17	13
1	4	2	6	3	5	1
7	10	8	12	9	11	7
19	22	20	24	21	23	19

3. Cada cadena de palabras termina en "God" ("Dios"). Esta respuesta puede parecer un signo de la Providencia, pero en realidad es el resultado del "recuento de Kruskal", un principio que el matemático Martin Kruskal fue el primero en observar, hacia los años setenta. Cuando el número total de palabras de un texto es notablemente mayor que el máximo número de letras de la palabra más larga, es probable que dos cadenas de palabras, de comienzo arbitrario, se intersequen en una palabra clave. A partir de ahí, claro está, las cadenas se hacen idénticas. Al aumentar la longitud del texto, aumenta la probabilidad de la intersección.



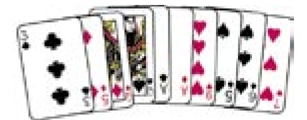
Me ocupé del principio de Kruskal en abril de 1978. El matemático John Allen Paulos aplica el principio a las cadenas de palabras de su próximo libro, *Once upon a Number*.

4. Por sencillez, imaginemos un mazo de sólo 10 naipes, en el que las cartas negras y rojas se alternan como sigue: NRNRNRNRNR. Al cortar este mazo por la mitad, resultarán dos montoncitos de cinco cartas: NRNRN y RNRNR. Al empezar la barajadura por peinado, la carta situada abajo de uno de los mazos es roja y, negra, la situada en lo bajo del otro. Si la carta roja es la primera que cae sobre la mesa, las cartas inferiores de ambos mazos serán negras, por lo que la siguiente carta que caiga creará un par roja-negra sobre la mesa. Y si la carta negra cae la primera, las cartas de lo bajo de ambos mazos serán rojas, con lo que la próxima carta que caiga creará un par negra-roja. Una vez que han caído las dos primeras cartas —no importa de qué mazo provengan— la situación será la misma que se tenía al principio: las cartas inferiores de ambos mazos serán de distinto color. El proceso se repite entonces, garantizando una carta negra y una carta roja en cada par sucesivo, aun cuando queden adheridas algunas de las cartas (*abajo*).

PEINADO CONCIENZUDO

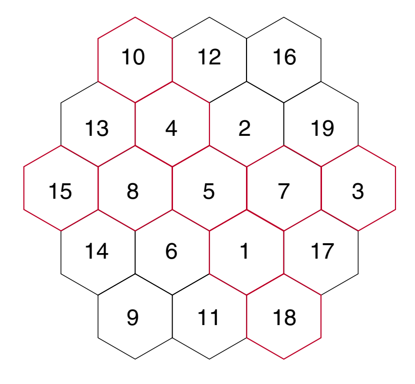


PEINADO CON ADHERENCIA

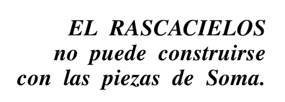


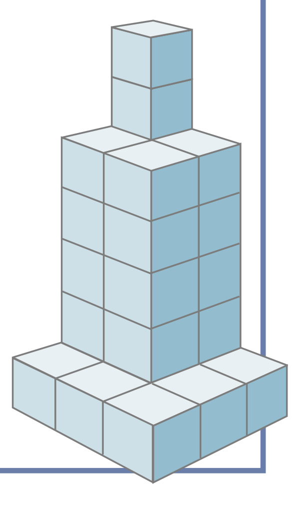


Este fenómeno se conoce por principio de Gilbreath, en honor de su descubridor, Norman Gilbreath, un ilusionista de California. Lo expliqué en mi artículo de octubre de 1960, y volví a ocuparme de él en septiembre de 1972. Los ilusionistas han inventado más de 100 trucos de cartas basados en este principio y sus generalizaciones. —*M.G.*



***EL HEXAGONO MAGICO** tiene una propiedad única y exclusiva: todas las casillas que estén en línea recta tienen suma 38.*





***EL RASCACIELOS** no puede construirse con las piezas de Soma.*

Riego con agua del mar

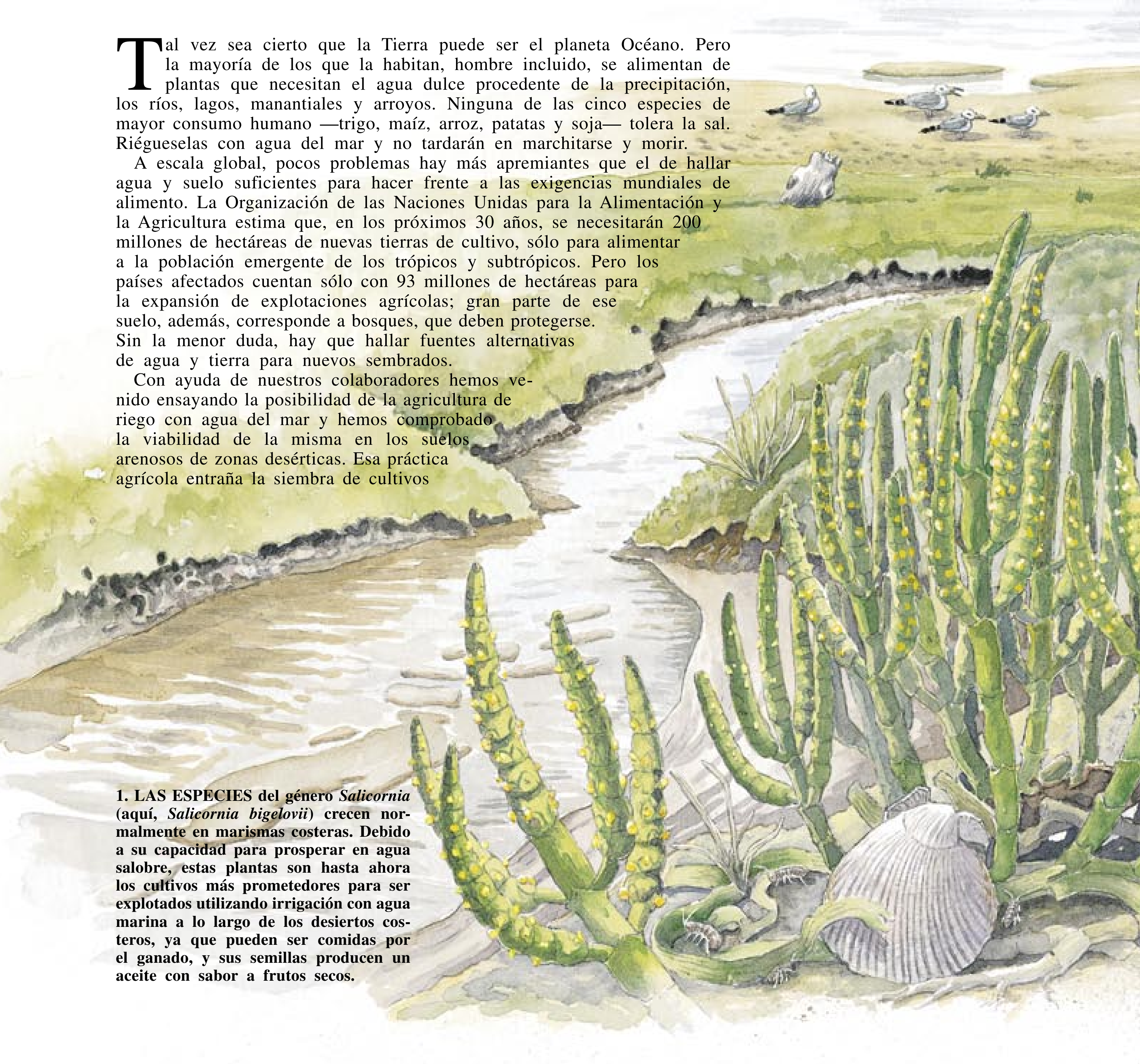
Ante el incesante crecimiento demográfico y la escasez de reservas de agua dulce, se trabaja con éxito en el aprovechamiento del agua del mar para determinados cultivos

Edward P. Glenn, J. Jed Brown y James W. O'Leary

Tal vez sea cierto que la Tierra puede ser el planeta Océano. Pero la mayoría de los que la habitan, hombre incluido, se alimentan de plantas que necesitan el agua dulce procedente de la precipitación, los ríos, lagos, manantiales y arroyos. Ninguna de las cinco especies de mayor consumo humano —trigo, maíz, arroz, patatas y soja— tolera la sal. Riégueselas con agua del mar y no tardarán en marchitarse y morir.

A escala global, pocos problemas hay más apremiantes que el de hallar agua y suelo suficientes para hacer frente a las exigencias mundiales de alimento. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura estima que, en los próximos 30 años, se necesitarán 200 millones de hectáreas de nuevas tierras de cultivo, sólo para alimentar a la población emergente de los trópicos y subtrópicos. Pero los países afectados cuentan sólo con 93 millones de hectáreas para la expansión de explotaciones agrícolas; gran parte de ese suelo, además, corresponde a bosques, que deben protegerse. Sin la menor duda, hay que hallar fuentes alternativas de agua y tierra para nuevos sembrados.

Con ayuda de nuestros colaboradores hemos venido ensayando la posibilidad de la agricultura de riego con agua del mar y hemos comprobado la viabilidad de la misma en los suelos arenosos de zonas desérticas. Esa práctica agrícola entraña la siembra de cultivos



1. LAS ESPECIES del género *Salicornia* (aquí, *Salicornia bigelovii*) crecen normalmente en marismas costeras. Debido a su capacidad para prosperar en agua salobre, estas plantas son hasta ahora los cultivos más prometedores para ser explotados utilizando irrigación con agua marina a lo largo de los desiertos costeros, ya que pueden ser comidas por el ganado, y sus semillas producen un aceite con sabor a frutos secos.



tolerantes a la sal y regados con agua bombeada del mar. Esta no plantea problemas de escasez. En nuestro planeta el 97 % del agua se almacena en los océanos. Tampoco andamos cortos de desierto. El 43 % de la superficie sólida es árida o semiárida. Sin embargo, sólo una fracción pequeña se halla en la cercanía del mar donde poder acometer este tipo de agricultura. En nuestra opinión, hasta un 15 % de suelos de desiertos salobres costeros e interiores, ahora desaprovechados, podrían destinarse al cultivo de riego marino. Hablamos de 130 millones de hectáreas de nuevas tierras de labor que podrían agregarse a las ya dedicadas a sembrado y forraje, sin tener que talar bosques ni derivar agua dulce —más escasa— para uso agrícola.

La agricultura de riego con agua del mar —una idea antiquísima— no se tomó en serio hasta hace una cincuentena de años. En 1949, Hugo Boyko, ecólogo, y Elisabeth Boyko, experta en horticultura, llegaron a Eliat, ciudad del mar Rojo, para preparar un terreno que hiciera atractivo el asentamiento de futuros colonos. (Estamos en el período de formación del estado de Israel.) Ante la falta de agua dulce, los Boyko utilizaron un pozo salobre y agua del mar directamente bombeada. Observaron que en aquel suelo arenoso muchas plantas crecían rompiendo sus propios límites normales de salinidad. Aunque bastantes ideas de los Boyko acerca de la tolerancia de las plantas a la sal no han resistido la prueba del tiempo, su trabajo despertó un notable interés (incluido el nuestro) por elevar el listón de la salinidad que condiciona la agricultura de riego tradicional.

La agricultura de riego con agua del mar debe cumplir dos requisitos, si quiere ser rentable. En primer lugar, ha de producir cosechas cuyo valor justifique la inversión del bombeo. En segundo lugar, tiene que emplear técnicas agronómicas que no dañen el entorno, la llamada agricultura viable o sostenible. No era tarea fácil satisfacer ambas exigencias. Pero algún éxito hemos tenido.

La investigación de la agricultura de riego con agua del mar tomó dos caminos. Hubo quien buscó injertar la halotolerancia en el trigo, la cebada y otros cultivos clásicos. Sin ir más lejos, el grupo de Emmanuel Epstein, de la Universidad de California en Davis, mostró en 1979 lo que habían logrado con determinadas razas de cebada; éstas, que medraban, generación tras generación, en presencia de bajos niveles de sales, producían cierta cantidad de grano si se regaban con agua de mar, más salada en comparación.

Desgraciadamente, cuantos esfuerzos se empeñaron luego en incrementar la tolerancia a la sal de cultivos comunes por procedimientos habituales de mejora vegetal y por ingeniería genética —en la que se introducen de manera directa en la planta genes de tolerancia a la sal— no han logrado obtener especímenes capaces de resistir el agua del mar. Ni siquiera en especies domésticas más tolerantes a la sal, como la palmera datilera, el límite superior de salinidad para el riego a largo plazo alcanza las cinco partes por 1000, menor por consiguiente que el 15 % del contenido salino del agua del mar. En condiciones normales, dicha concentración viene a ser de 35 partes por 1000. Cifra que se eleva a las 40 partes por 1000, en las aguas que bañan las riberas desérticas del mar Rojo, la parte norte del golfo de California (entre la costa oeste de Sonora y Baja California) y el golfo Pérsico. (El cloruro sódico, o sal de mesa, es el componente dominante del agua de mar y el más dañino para el desarrollo de la planta.)

Nosotros nos centramos en la domesticación de halófitos con el fin de aprovecharlos en la mesa y el establo o utilizar sus semillas oleaginosas. Los halófitos son plantas silvestres que muestran una notable tolerancia a la sal. De entrada suponíamos que no sería nada fácil cambiar los mecanismos fisiológicos fundamentales por los que una planta resulta vulnerable a la concentración salina y convertirlos en resistentes; más viable

EDWARD P. GLENN, J. JED BROWN y JAMES W. O'LEARY suman 45 años de experiencia estudiando la agricultura de regadío con agua del mar en zonas desérticas. Glenn comenzó su carrera de "agrónomo marino", así se autodenomina, en 1978, tras doctorarse en la Universidad de Hawai. Hoy enseña en el departamento de edafología de la Universidad de Arizona en Tucson, donde acaba de doctorarse Brown. En ese mismo centro superior O'Leary da clases de botánica. Autor de más de 60 publicaciones sobre fitología, O'Leary ha colaborado en comisiones oficiales para sopesar las perspectivas de la agricultura de regadío con agua del mar en países en vías de desarrollo.





2. LA AGRICULTURA CON AGUA MARINA puede requerir técnicas agronómicas diferentes de las empleadas en la del agua dulce. Para cultivar *Atriplex,* una planta tolerante a la sal y potencial alimento para el ganado, los agricultores deben inundar sus campos frecuentemente con agua marina (*izquierda*). Además, las tuberías de dispersión (*centro*) serán de plástico para evitar que el esqueleto de la red de distribución se oxide al contacto con el agua salada. Otras técnicas pueden seguir igual; para recoger las semillas de *Salicornia* sirven las cosechadoras al uso.

sería, imaginábamos, domesticar una planta silvestre tolerante a la sal. Al fin y al cabo, todas las especies domésticas de nuestros días proceden de antepasados silvestres. Más: algunos halófitos —*Distichlis palmeri* (hierba de Palmer)— han sido consumidos durante generaciones por los indígenas, cocopah incluidos, que viven en la desembocadura del río Colorado en el golfo de California.

Antes de empezar los ensayos de agricultura de regadío con agua del mar, nos procuramos varios cientos de halófitos de todo el mundo, cuya tolerancia a las sales y contenido nutritivo examinamos. Hay de 2000 a 3000 halófitos; de todos los portes: herbáceos, arbustivos y arbóreos. Ocupan un amplio rango de ecosistemas, que van de las húmedas marismas costeras hasta los secos desiertos salinos del interior. En colaboración con el equipo de Dov Pasternak, de la Universidad Ben Gurion del Negev en Israel, y de los etnobotánicos Richard S. Felger y Nicholas P. Yensen (entonces en la Universidad de Arizona), escogimos una docena de halófitos que prometían arraigar en las condiciones agronómicas de los campos experimentales.

Los ensayos con esos especímenes empezaron en 1978. Los acometimos en el desierto costero de Puerto Peñasco, en el oeste mexicano. Regábamos las plantas, con periodicidad diaria, por inundación de los campos con agua del mar del golfo de California. Su salinidad era de 40 partes por 1000. Puesto que la precipitación en Puerto Peñasco sólo alcanza una media de 90 milímetros al año, y nosotros inundábamos las parcelas con una profundidad total anual de 20 metros o más de agua del mar, estaba claro que las plantas vivían de agua marina de forma casi exclusiva. (Calculamos la precipitación y el riego caídos de acuerdo con la altura en metros, no en metros cúbicos, que es una medida de volumen.)

El rendimiento variaba de una especie a otra. Los halófitos más productivos daban de uno a dos kilos de biomasa seca por metro cuadrado, lo que se aproxima al rendimiento de la alfalfa regada con agua dulce. Se mostraron productivas y tolerantes a la sal ciertas especies arbustivas de *Salicornia*, *Suaeda* y *Atriplex*, de la familia de las Quenopodiáceas (que aloja un 20 % de todas las especies de halófitos). *Distichlis*, herbácea de la familia de las Poáceas, y *Batis*, trepadora de hojas suculentas de la familia de las Batidáceas, ofrecían, a su vez, un gran rendimiento.

Mas, para satisfacer el primer requisito de rentabilidad, teníamos que demostrar que los halófitos eran capaces de reemplazar a los cultivos tradicionales en un aprovechamiento determinado. Atendimos, pues, a la posibilidad de que sirvieran para forraje. La obtención de alimento suficiente para vacas, ovejas y cabras constituye uno de los problemas agrícolas más espinosos de los secanos del mundo (el 46 % de los cuales ha visto mermado su poder por sobrepastoreo, según el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas).

Muchos halófitos tienen altos niveles de proteínas y carbohidratos digeribles, pero les acompañan grandes cantidades de sales; la acumulación de sales constituye una forma de adaptarse a un ambiente salino. El alto contenido en sales de los halófitos rebaja su valor nutricional, ya que las sales no tienen calorías y, sin embargo, ocupan espacio. Además, tamaña salinidad limita la cantidad que puede ser ingerida por un animal. En situaciones de pastoreo libre los halófitos se consideran “pastos de reserva”, a los que los animales acuden sólo cuando han agotado bocados más apetecibles.

Nos proponíamos incorporar halófitos en una dieta mixta del ganado. Esas plantas sustituirían el forraje acostumbrado de heno, hasta constituir entre un 30 y un 50 % del consumo de cabras y ovejas. (Hablamos de porcentajes que corresponden a los típicos niveles de forraje utilizados en animales de engorde.) Y vimos que los individuos sometidos a dietas que contenían *Salicornia*, *Suaeda* y *Atriplex* ganaban tanto peso como sus compañeros cuyas dietas incluían heno. Además, la calidad de la carne de los animales experimentales no se resentía de su ingesta abundante en halófitos. Al contrario de lo que temíamos en un comienzo, los animales no mostraron aversión a los halófitos en dietas mixtas; antes bien, parecían atraídos por su sabor salado. Pero los que seguían una dieta rica en halófitos bebían más agua que los alimentados con heno, para compensar el consumo extra de sales. Además, la tasa de conversión alimentaria de los animales de prueba (la cantidad de carne producida por kilogramo de



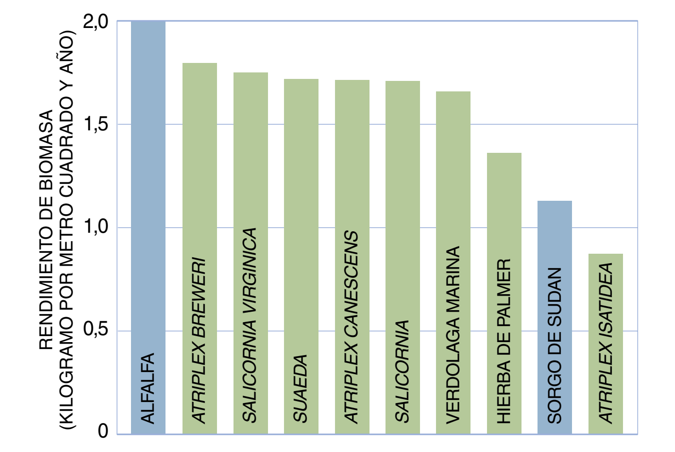
alimento) fue un 10 % menor que la de los animales sometidos a la dieta tradicional.

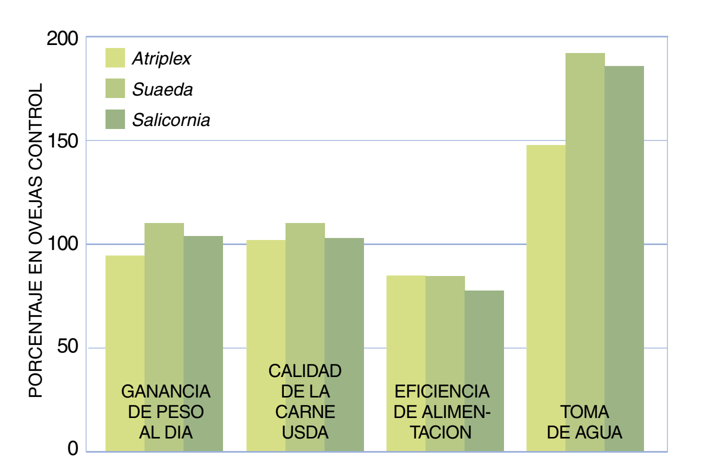
El halófito más gratificante con que nos hemos encontrado es *Salicornia bigelovii*. Esta planta de las marismas, sin hojas, suculenta y anual, coloniza llanuras cenagosas mediante una producción prolífica de semillas. Encontramos, en las semillas, concentraciones elevadas de aceite (30 %) y proteínas (35 %), niveles muy similares a los registrados en la soja y otras semillas oleaginosas. El contenido en sales se halla, sin embargo, por debajo del 3 %. Producen un aceite altamente poliinsaturado, parecido en su composición de ácidos grasos al aceite de cártamo. Puede extraerse de la semilla y refinarse según lo acostumbrado en oleaginosas; además, es ingerible, con un agradable sabor a frutos secos y una textura similar al aceite de oliva. Aunque presenta el pequeño inconveniente de que la semilla contiene saponinas, compuestos amargos que la hacen incomestible en crudo. Pese a que las saponinas no contaminan el aceite, permanecen en la harina después de la extracción de éste. En consecuencia, las saponinas limitan la cantidad de harina que puede emplearse en dietas avícolas; ello no empece, según se ha demostrado por vía experimental, que la harina de semillas de *Salicornia* pueda reemplazar harinas de semillas tradicionales, en la proporción que se usa como suplemento de proteínas en las dietas de ganado. Se aprovechan, pues, todas las partes de la planta.

Hemos intervenido en el establecimiento de varios prototipos de explotaciones agrarias de *Salicornia* de más de 250 hectáreas, en México, los Emiratos Arabes Unidos, Arabia Saudí e India. En seis años de campos experimentales que cultivamos en México, la planta produjo una cosecha media anual de 1,7 kilogramos por metro cuadrado de biomasa total y 0,2 kilogramos por metro cuadrado de semillas de aceite, rendimiento que iguala o excede al de la soja y otras semillas oleaginosas cultivadas en regadíos de agua dulce. En otro orden, hemos indicado cómo proteger el equipo de instalación y distribución del riego ante la agresión corrosiva del agua del mar. Aunque la infraestructura del riego con agua de mar diverge del tendido de agua dulce, no hemos encontrado ningún problema insalvable de ingeniería al saltar de escala, es decir, de la parcela experimental a la explotación agraria.

En situaciones normales, los sembrados se riegan cuando la sequedad del suelo se halla en torno al 50 % de su capacidad de campo, esto es, la cantidad de agua que es capaz de retener. En los regadíos tradicionales, además, el campesino añade sólo el agua suficiente para reemplazar la consumida. Cuando se trata del agua del mar, por contra, se exige un riego copioso y frecuente, diario incluso, para evitar que la sal acumulada en la zona radicular crezca hasta niveles que impidan el desarrollo.

Regábamos con derroche nuestros primeros campos experimentales (20 metros de agua al año). Pero en 1992 iniciamos una serie de experimentos que se proponían determinar la cantidad mínima necesaria para obtener un buen rendimiento. Dedicamos dos años de ensayos de campo al cultivo de plantones de *Salicornia* colocados en cajas de tierra que hundimos en las parcelas de regadío con agua del mar. Las cajas en cuestión, llamadas lisímetros, llevaban un desagüe en el fondo, que conducía el agua sobrante, drenada, hacia puntos colectores preparados fuera de las parcelas; allí podíamos medir el volumen y salinidad del agua de drenaje. Con esos datos se realizaron los primeros cálculos de los balances de sales y agua requeridos por un cultivo de regadío con agua del mar. Comprobamos que la cantidad de biomasa producida en una cosecha depende de la cantidad de agua aplicada. Aunque *Salicornia* resiste con una salinidad en el agua que baña sus raíces superior a las 100 partes por mil —unas diez veces la salinidad normal del océano—,





3. EL RENDIMIENTO de los cultivos tolerantes a la sal según las pautas de la agricultura de riego con agua del mar no difiere del obtenido en dos especies forrajeras cultivadas con agua dulce de riego: la alfalfa y el sorgo de Sudán (*barras azules de la izquierda*). Las ovejas que se han criado con una dieta suplementada con plantas halotolerantes como *Suaeda*, *Atriplex* y *Salicornia*, ganan al menos tanto peso y producen carne de la misma calidad que las ovejas control alimentadas con heno; debe señalarse, sin embargo, que no transforman tanta ingesta en carne (la llamada tasa de conversión) y deben abrevar el doble (*derecha*) al objeto de compensar el consumo extra de sales.

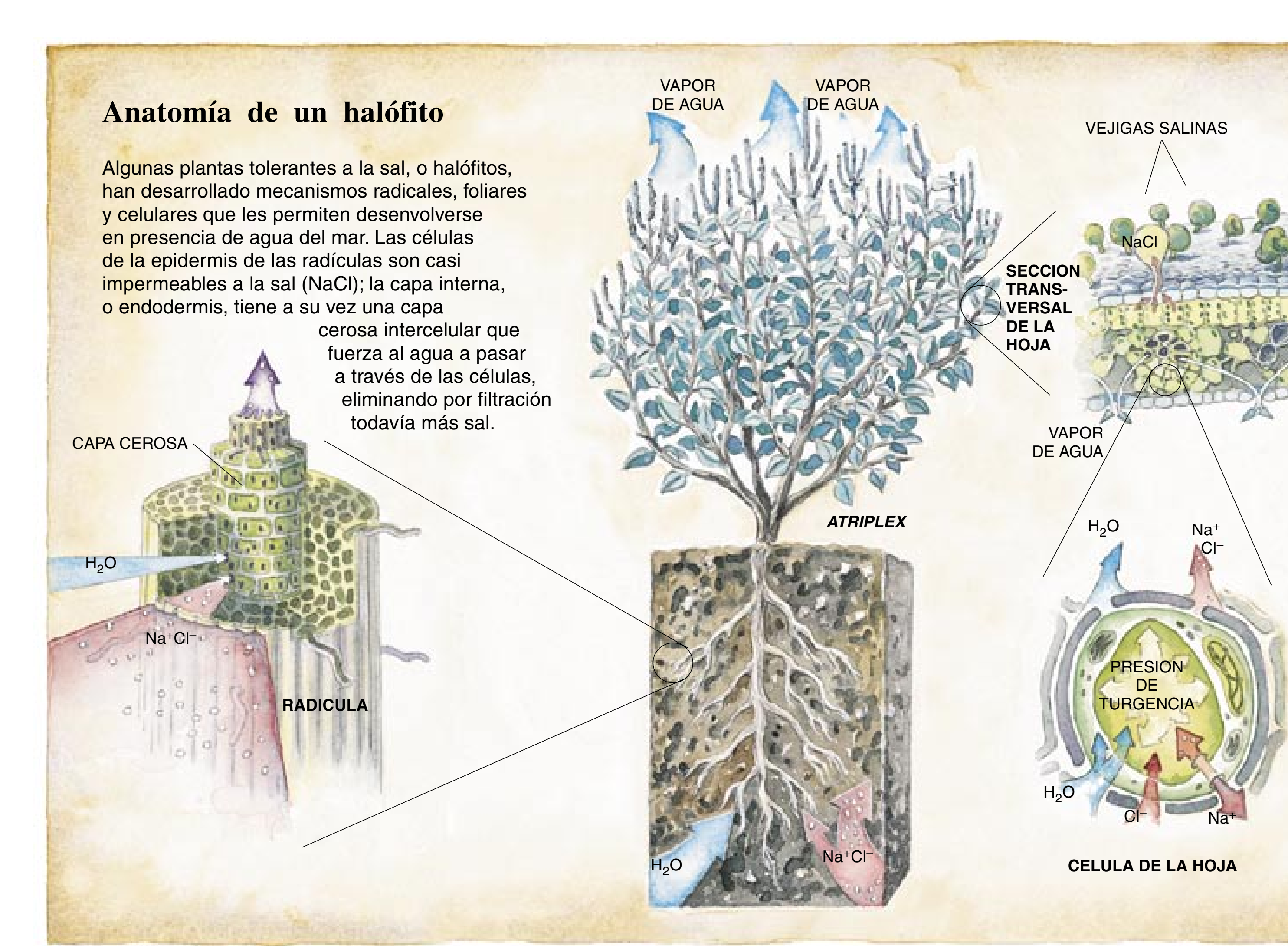
requiere un 35 % más de riego que los sembrados de agua dulce. Por una poderosa razón: a medida que la planta va absorbiendo selectivamente agua del riego marino, deja demasiado salado el flujo acuoso restante como para aprovecharlo.

¿Puede ser rentable la agricultura de regadío con agua del mar? La partida mayor en la inversión se la lleva el bombeo del agua, cuyos costes son directamente proporcionales a la cantidad de agua a bombear y la altura a que se eleva. Aunque los halófitos requieren más agua que los sembrados tradicionales, las explotaciones agrarias costeras no necesitan elevar tanto el agua; es bastante común que los cultivos tradicionales extraigan el agua de pozos a más de 100 metros de profundidad. Puesto que el bombeo de agua del mar en la línea de costa es más barato que el bombeo de agua dulce procedente de pozos, la agricultura que propugnamos debería ser rentable en regiones desérticas, aun cuando su rendimiento sea menor que el de la agricultura tradicional.

El riego con agua del mar no requiere ningún equipamiento especial. Las explotaciones experimentales en cuyo establecimiento hemos participado han recurrido lo mismo al riego por inundación que al riego por aspersión. Los tinglados de aspersión se emplean en diversos tipos de explotación. Para su aplicación con agua del mar se introduce una tubería de plástico en la guía para que el agua no entre en contacto con el metal. En lo concerniente a faenas ulteriores, sépase que las semillas de *Salicornia* se cosechan muy bien con máquinas ajustadas para maximizar la retención de semillas diminutas, de un miligramo de peso.

Con todo, y siendo *Salicornia* la que mejor resultado nos ha dado, su cultivo no está exento de complicaciones. Las plantas tienden a echarse (postrarse sobre el terreno) al acercarse la cosecha, con el riesgo añadido de que expulse las semillas antes de recogerlas. Además, sólo se recupera el 75 % de las semillas, cuando se supera el 90 % en la mayoría de los cultivos. Por si fuera poco, para mantener un alto rendimiento de semillas, *Salicornia* debe crecer durante unos 100 días a bajas temperaturas antes de florecer. Su producción actual está restringida a los subtrópicos, con inviernos fríos y veranos cálidos; pero las mayores extensiones de desierto costero se hallan en los trópicos, donde aprieta más el calor.

Afirmábamos que la segunda condición a satisfacer por la agricultura de regadío con agua del mar era la de su viabilidad a largo plazo. Pero no es un problema exclusivo suyo. Muchos proyectos de irrigación con agua dulce no aprueban el test de viabilidad (o sostenibilidad). En las regiones áridas se riega a menudo en cuencas interiores de drenaje restringido, dando por resultado la acumulación de sal en las capas freáticas. Entre el 20 y el 24 % de los campos de regadío tradicionales sufren acumulación de sal y formación de bolsas de agua en la zona radicular. Cuando el problema se exacerba, hay que instalar sistemas de drenaje subsuperficial costosos. Deshacerse del agua de drenaje supone un problema adicional; a este respecto, en el valle de San Joaquín en California, el agua sobrante drenada hacia una zona húmeda provocó la muerte, o alteraciones deformantes, en ciertas aves acuáticas debido a los efectos tóxicos del selenio. Este elemento, común en suelos del oeste de los Estados Unidos, se había acumulado en altas concentraciones en el agua drenada.



4. DE ALGUNAS ZONAS de los desiertos costeros (*en verde*) podría sacarse provecho a través de la implantación de regadíos con agua del mar o extraída de acuíferos subterráneos salobres. Bajo esas condiciones medran cultivos tolerantes a la sal para alimento o para forrajeo animal.



La agricultura de regadío con agua de mar, aunque no se halla libre de esos problemas, ofrece algunas ventajas. En primer lugar, los suelos arenosos de desiertos costeros suelen presentar un drenaje de vuelta al mar sin mayores obstáculos. Lo hemos comprobado en el riego de nuestros campos durante casi 10 años consecutivos sin que se acumularan agua o sales en la zona de la raíz. En segundo lugar, los acuíferos de los desiertos salinos costeros e interiores tienen ya elevadas concentraciones de sal; no habrán de verse perjudicados por culpa del agua del mar. En tercer lugar, los suelos que proponemos para aplicar nuestra técnica son punto menos que estériles en un comienzo; lo que significa que en ellos el regadío con agua del mar no afectaría a ecosistemas vulnerables, ni de lejos en la medida en que incide la agricultura normal.

Pero no hay explotación que sea absolutamente inocua. La acuicultura costera de camarones ha provocado la multiplicación desaforada de las algas y ha traído la degradación a ríos y bahías que reciben sus aguas residuales, ricas en nutrientes. Cabría prever un problema similar en las explotaciones comerciales de halófitos; el gran volumen de agua de drenaje de elevada salinidad portaría fertilizantes no utilizados que acabaría en el mar. Pero los campos de regadío con agua del mar podrían ayudar a solucionar el problema si los vertidos de los tanques de camarones se reciclaran en sembrados de halófitos, en vez de descargarlos directamente al mar. El campo de halófitos recuperaría nutrientes del vertido y reduciría su volumen. La primera plantación experimental que instalamos en México recicla el vertido de una explotación de camarones, y se sigue trabajando en la asociación entre vertidos de la acuicultura marina y explotaciones de halófitos.

Se ha pensado también en sembrar halófitos para reciclar el agua de drenaje agrícola rica en selenio generada en el Valle de San Joaquín en California; este nutriente, esencial a niveles bajos, se convierte en tóxico a altas concentraciones. Los halófitos regados con el agua de drenaje del valle absorben selenio suficiente para servir de forraje, sin llegar al exceso que los haría dañinos.

¿Se practicará alguna vez la agricultura con agua marina a gran escala? Nuestra meta a finales de los años setenta era establecer la viabilidad de la agricultura con agua marina; esperábamos ver explotaciones comerciales en el plazo de diez años, pero veinte años después esta técnica está todavía en el estadio de prototipo de desarrollo comercial. Varias compañías han establecido explotaciones de prueba de *Salicornia* o *Atriplex* en California, México, Arabia Saudí, Egipto, Pakistán e India; sin embargo, según nuestra información, ninguna ha comenzado la producción a gran escala. Nuestra experiencia investigadora nos convence de la viabilidad de la agricultura con agua marina. Pero que el mundo termine por adoptar o no su práctica dependerá de la economía, las futuras necesidades de alimentos y de que los ecosistemas de agua dulce permanezcan a salvo para un ulterior desarrollo agrícola.



Esta *Atriplex* y otros halófitos tienen, en las hojas, unas células especializadas de nombre vejigas de sal que almacenan el exceso de NaCl; las vejigas estallan cuando están llenas y liberan la sal en una capa plateada que refleja la luz y enfría la hoja. El vapor de agua escapa por los poros del envés de las hojas.

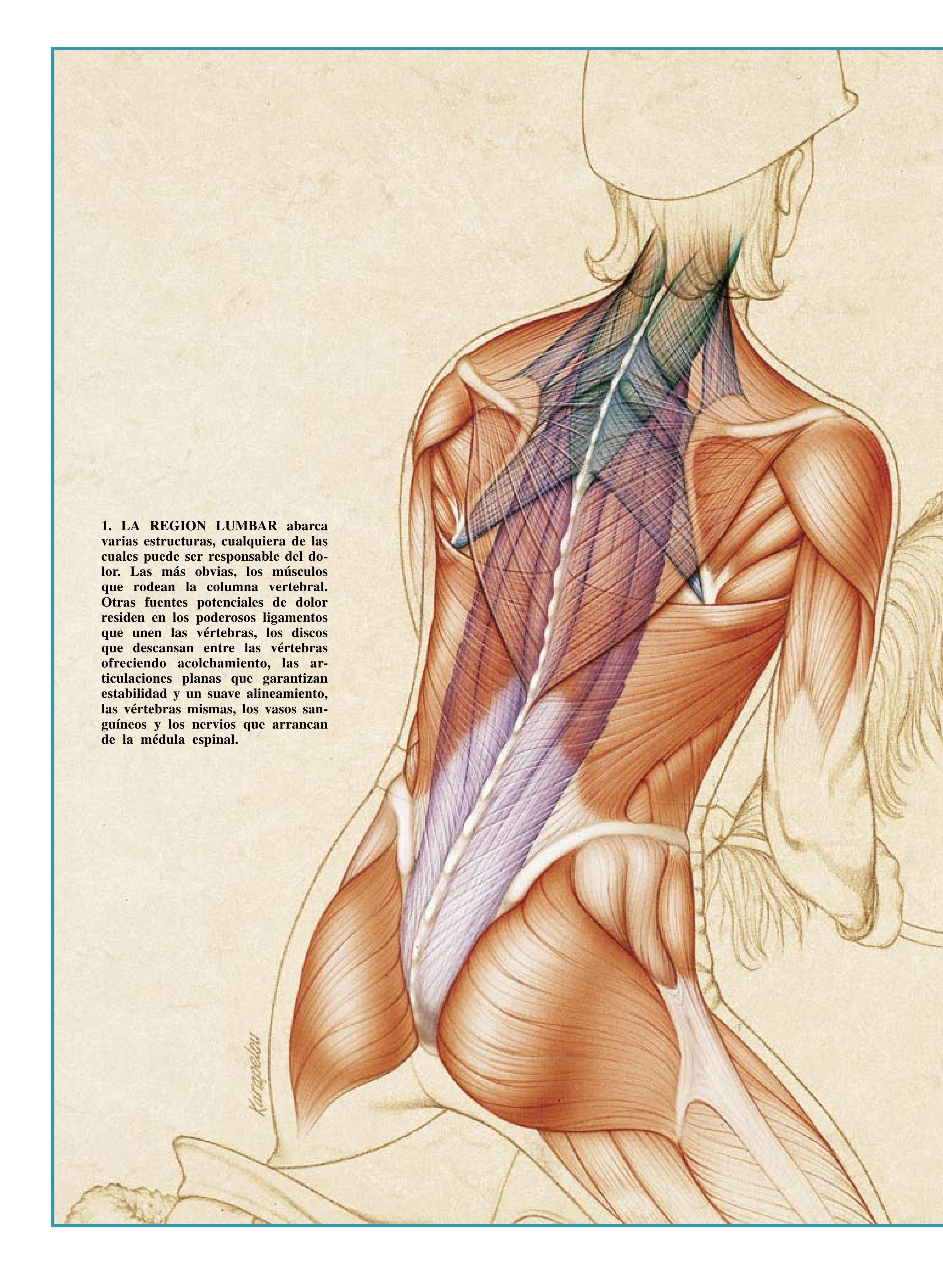
Las células del interior foliar se hallan preparadas para habérselas con la sal absorbida, del tipo que sea, por la planta. En cada célula, la vacuola central, o zona de almacenamiento, lleva moléculas que importan específicamente los iones sodio (Na^+), y les siguen los iones cloruro (Cl^-). La alta concentración de Na^+ y Cl^- atrae el agua, manteniendo así la presión de turgencia de la célula.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SALICORNIA BIGELOVII TORR.: AN OIL SEED HALOPHYTE FOR SEAWATER IRRIGATION. E. P. Glenn, J. W O'Leary, M. C Watson, T. L. Thompson y R. O. Kuehl en *Science*, volumen 251, págs. 1065-1067; 1 de marzo, 1991.

TOWARDS THE RATIONAL USE OF HIGH SALINITY TOLERANT PLANTS. H. Lieth y A. A. Al Masoom. Serie: *Task for Vegetation Science*, vol. 28. Kluwer Academic Publishers, 1993.

HALOPHYTES. E. P. Glenn en la *Encyclopedia of Environmental Biology*. Academic Press, 1995.



1. LA REGION LUMBAR abarca varias estructuras, cualquiera de las cuales puede ser responsable del dolor. Las más obvias, los músculos que rodean la columna vertebral. Otras fuentes potenciales de dolor residen en los poderosos ligamentos que unen las vértebras, los discos que descansan entre las vértebras ofreciendo acolchamiento, las articulaciones planas que garantizan estabilidad y un suave alineamiento, las vértebras mismas, los vasos sanguíneos y los nervios que arrancan de la médula espinal.



Dolor lumbar

Aunque no acabamos de conocer su etiología, han mejorado las opciones terapéuticas. A menudo, el poder curativo del propio cuerpo constituye el remedio más fiable

Richard A. Deyo

El catálogo de certezas de la vida suele limitarse a la muerte y a los impuestos. En una lista más verosímil habría que incluir el dolor lumbar. Hasta un 80 por ciento de los adultos lo sufren alguna vez. Se cuenta, además, entre los primeros motivos de visita al médico, de hospitalización, intervención quirúrgica y baja laboral. El coste combinado de la medicación asociado al dolor lumbar y a las compensaciones por incapacidad laboral se cifra en billones de pesetas. El dolor de espalda constituye, en efecto, una de las afecciones médicas no letales más importantes de nuestra sociedad. Pero eso no obsta para que su incidencia sea parangonable con la magnitud del misterio que lo acompaña.

Reparemos en la paradoja siguiente. La economía occidental es postindustrial. Retrocede el trabajo pesado, se multiplican los sistemas automáticos y se van generalizando los robots. Por su parte, la medicina ha perfeccionado el diagnóstico por imagen de la médula espinal y ha desarrollado nuevas formas de tratamiento quirúrgico y médico. Ello no obstante, la incapacidad laboral debida al dolor de espalda está en aumento.

Considerar experto en dolores de espalda al médico quizá sea excesivo. En la mejor de las hipótesis, la medicina tiene una comprensión limitada de esa patología. Y lo que es peor, la pervivencia de ideas añejas podría haber agravado el problema. Las normas de antaño se basaban en pruebas débiles de inferencia fisiológica e informes de casos clínicos, más que en hallazgos clínicos obtenidos mediante ensayos rigurosos y controlados.

El lado bueno del asunto es que la mayoría de los pacientes se recuperarán bien y pronto, pese a la intensidad del dolor. Este pronóstico conserva su validez con independencia del tratamiento e incluso sin tratamiento alguno. Sólo una minoría de pacientes causarán baja laboral. La mayoría de los que tengan que faltar al trabajo se podrán reincorporar antes de que transcurran seis semanas y sólo una pequeña fracción cursará baja definitiva (alrededor de un uno por ciento de la fuerza laboral padece una incapacidad crónica causada por problemas de espalda). En conjunto, pues, el pronóstico de quien padezca dolor lumbar agudo es bastante bueno. El lado malo estriba en la recurrencia, frecuente. En su mayoría, los pacientes experimentarán algún otro episodio. Para nuestra fortuna, las recurrencias tienden a asemejarse al episodio original y la recuperación torna a ser general, pronta y espontánea.

El dolor lumbar es un síntoma que puede traducir distintas afecciones lumbares. Parte del misterio del dolor de espalda deriva del desafío diagnóstico que supone desentrañar su origen dentro de un sistema mecánico y bioquímico con muchos componentes, cualquiera de los cuales puede resentirse. Podrían intervenir las lesiones musculares y ligamentosas, lo mismo que la artritis de articulaciones compuestas y discos intercalares. Podría causarlo la herniación de un disco, esto es, la protrusión del material acolchado interno, si irrita una raíz nerviosa adyacente. El pinzamiento de un nervio puede, a su vez, deberse a una estenosis o estrechamiento del canal espinal; la estenosis suele ir asociada a envejecimiento y desgaste de discos, articulaciones planas y ligamentos del canal espinal.

RICHARD A. DEYO, internista interesado en clínica de trastornos lumbares, enseña en la Universidad de Washington. Ha estudiado diversas terapias para el dolor lumbar, desde el reposo en cama hasta ejercicios regulados pasando por la estimulación nerviosa eléctrica transcutánea.

El dolor lumbar podrían explicarlo las alteraciones congénitas espinales. Las estructuras resultantes no suelen dar síntomas, pero pueden acarrear problemas en función del grado de severidad. De su existencia podríamos culpar, también, a las enfermedades del riñón, del páncreas, aorta y órganos genitales. Por último, el dolor lumbar podría denunciar la presencia subyacente de cáncer, infecciones óseas o formas raras de artritis, entre otras graves patologías. Por suerte, este tipo de causas son rarísimas: el 98 por ciento de los pacientes con problemas lumbares deben sus molestias a la lesión, habitualmente transitoria, de los músculos, los ligamentos, los huesos o los discos.

A la complejidad anatómica de la región lumbar se añade una de otra índole que dificulta el diagnóstico: la incierta relación entre los síntomas, las técnicas de formación de imágenes y las alteraciones anatómicas o fisiológicas. Por eso, la evaluación diagnóstica se propone, de entrada, descartar causas extremas de dolor (cáncer o infecciones), que pueden identificarse con mayor claridad, y determinar si el paciente tiene un nervio pinzado o irritado. Ello significa que hay un 85 por ciento de los pacientes sin diagnóstico definitivo.

Motivos principales de consulta médica primaria entre adultos

POSICION	
1	HIPERTENSION ARTERIAL
2	CUIDADOS OBSTETRICOS
3	REVISIONES, CONTROLES
4	RESFRIADOS
5	DOLOR LUMBAR
6	DEPRESION Y ANSIEDAD
7	DIABETES

Fuente: Encuesta Nacional de Atención Médica Ambulatoria, 1989-90

La mayoría no recuerda ningún incidente específico que desencadenara las molestias, ni se produjeron tras un esfuerzo de levantamiento de carga o de un traumatismo, factores de riesgo ambos. Lisa y llanamente, el dolor lumbar aparece. La comunidad médica, como si se hiciera eco de esa vaguedad, tampoco ha logrado acotar el origen de muchos episodios.

Parece que al dolor lumbar lo acunan las situaciones de tensión. En un estudio reciente acometido por el grupo de Astrid Lampe, de la Universidad de Innsbruck, se ponía de manifiesto la asociación entre acontecimientos vitales que generan tensión y episodios de dolor de espalda. En un trabajo anterior, Lampe descubrió que los pacientes sin una causa física que explicara su dolor vivían más tensos que un grupo control de pacientes a los que sí se había detectado una lesión orgánica. John E. Sarno, del hospital clínico de la Universidad de Nueva York, arriba a la conclusión según la cual los estados de carga emocional no resuelta producen tensión física que a su vez provocan dolor. Afirma que, en esta situación, el dolor permite desviar el estrés potencial que supondría enfrentarse a los conflictos psicológicos. Sarno ha recurrido con éxito a terapia psicológica en determinados pacientes.

El dolor muscular que aparece después de la actividad física es una causa probable de dolor lumbar, al igual que el desgaste natural de los discos y ligamentos que favorecen los microtraumatismos en estas estructuras, sobre todo a partir de cierta edad. Pero el diagnóstico de la causa genuina del dolor en un paciente dado puede resultar algo más próximo al arte que a la ciencia. Excluidas las enfermedades más severas, la recuperación espontánea es la regla; no hay necesidad, pues, de llegar a un diagnóstico exacto en la mayoría de los casos.

La falta de recursos para alcanzar un diagnóstico definitivo de la causa de dolor lumbar determinó que Daniel C. Cherkin, de Puget Sound, y mi grupo, de la Universidad de Washington, realizaran un sondeo, a escala nacional, entre médicos de distintas especialidades. Presentábamos casos normalizados. Preguntábamos a los sujetos de la muestra cómo tratarían a tales pacientes hipotéticos. Exacto reflejo de la incertidumbre que rodea al tema, las recomendaciones variaban mucho. Podría resumirse la discrepancia en el subtítulo que se dio a la publicación de los datos: “De tal médico tal receta”. Los reumatólogos doblaban la frecuencia de solicitud de pruebas de laboratorio que permitieran identificar afecciones de las articulaciones. Los neurocirujanos recurrieron con doble frecuencia a técnicas radiológicas en busca de hernias de disco. Los neurólogos tendían a triplicar la exigencia de electromiogramas para detectar un origen nervioso. La confusión que reina entre los pacientes no es menor que la de los médicos.

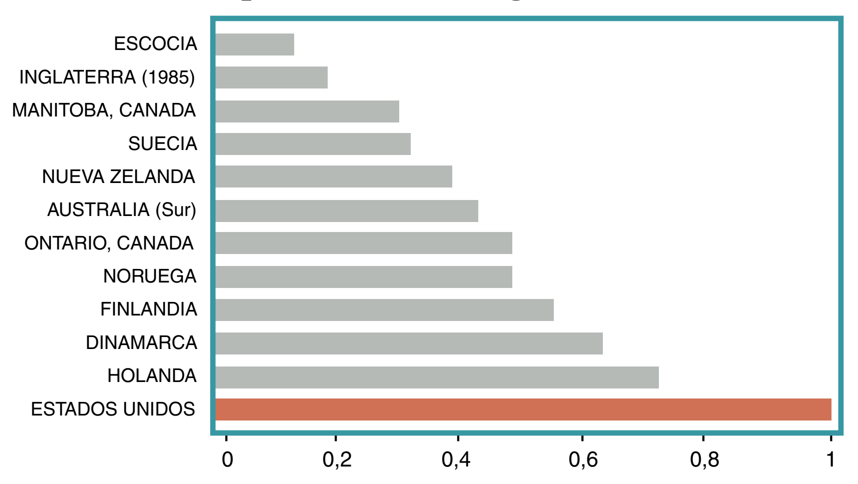
Hasta ayer mismo, la radiografía de columna constituía una etapa obligada para todos. La investigación ha ido desvirtuando su necesidad. En primer lugar, un estudio sueco de diez años de duración ha demostrado que las radiografías añaden poco a la exploración física realizada en la consulta, al menos en pacientes menores de 50 años. Sólo se detecta un hallazgo inesperado en uno de cada 2500 pacientes irradiados.

En segundo lugar, la investigación epidemiológica ha demostrado que se atribuye el origen del dolor a muchas afecciones de la columna vertebral, cuando, en realidad, no guardan vinculación alguna con los síntomas. En distintos países muchos individuos asintomáticos hubieron de pasar por la pantalla por razones laborales o revisiones rutinarias en incorporación a filas; pues bien, las estadísticas correspondientes revelan que las alteraciones de la columna y la médula son tan frecuentes entre personas asintomáticas como en las que sufren dolor. Las radiografías pueden inducir a confusión.

En tercer lugar, la radiografía lumbar expone inevitablemente a los órganos sexuales a radiaciones ionizantes, a una dosis mil veces superior que la de una radiografía de tórax. Por último, ni siquiera hay unanimidad entre radiólogos expertos a la hora de interpretar la misma radiografía, lo que no facilita el acierto en el diagnóstico y tratamiento. Ahora suele recomendarse que se limite la radiografía a quienes han sufrido lesiones mayores en una caída o en un accidente de automóvil.

Los médicos confiaban en que el refinamiento de las técnicas de formación de imágenes, así la tomografía axial computerizada (TAC) y la reso-

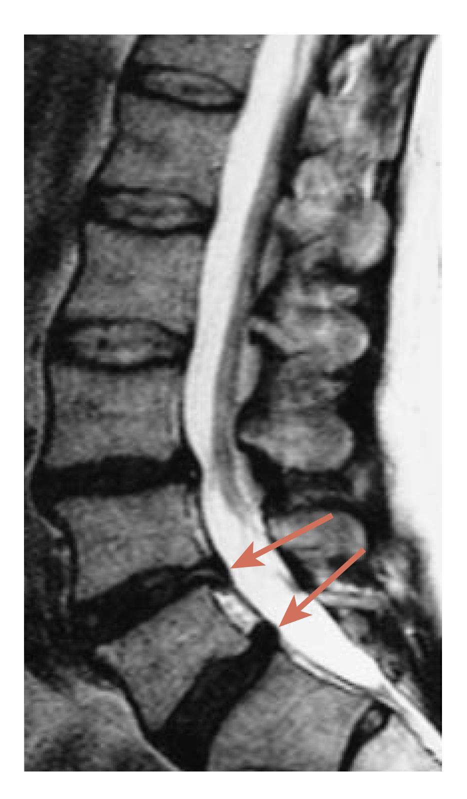
Comparación de cirugía lumbar



2. LOS INDICES DE CIRUGIA para el tratamiento del dolor lumbar varían mucho de un país a otro. En los EE.UU. se realizan cinco veces más operaciones que en Inglaterra. Las distintas actitudes culturales desempeñan un papel sutil en la percepción y el tratamiento del dolor de espalda, en el que la cirugía es un ejemplo claro. En Omán, por ejemplo, donde el dolor lumbar era frecuente, se desconocía la incapacidad por esta causa hasta la introducción de la medicina occidental, según un informe del ministro de Sanidad de 1986.

nancia magnética (RM), allanarían el camino para un diagnóstico preciso en la mayoría de los casos. Esperanza vana. Al igual que ocurre con la radiografía común, pueden descubrirse anomalías alarmantes en personas que no se quejaban de ningún dolor.

En 1990, Scott D. Boden y su grupo, del hospital clínico de la Universidad George Washington, estudiaron a 67 individuos que afirmaron no haber tenido nunca dolor de espalda o ciática (dolor en la pierna de origen lumbar). La hernia de disco, considerada a menudo culpable del dolor lumbar, se detectó por resonancia magnética en uno de cada cinco de estos sujetos menores de sesenta años. La mitad de este grupo de edad presentaba protrusión discal, una afección más leve a la que también se suele responsabilizar del dolor. En más de un tercio de los mayores de sesenta años se detectó mediante resonancia una hernia de disco, cerca del 80 por ciento presentaba protrusión discal y prácticamente todos cierta degeneración del disco debida a la edad. Se demostró estenosis del canal, rara en adultos jóvenes, en un quinto de esos mismos pacientes sexagenarios. En un trabajo similar publicado en 1994, el grupo de Michael N. Brant-Zawadzki, del hospital Hoag Memorial de Newport Beach, comprobó la presencia de anomalías del disco en dos tercios de los 98 participantes, que no padecían dolor. En conclusión, una hernia de disco descubierta gracias al diagnóstico por imagen sólo quiere decir una cosa: que el paciente tiene una hernia de disco.



3. LA IMAGEN ANORMAL en una resonancia magnética de un sujeto sin sintomatología ilustra uno de los principales errores en el diagnóstico sobre el origen del dolor lumbar. Numerosos estudios han demostrado que muchísimas personas asintomáticas presentan protrusiones o herniaciones de disco. Este individuo padecía dos herniaciones (*flechas*) y otras anomalías discales.

De lo anterior se desprende que el médico puede errar en su interpretación de las imágenes así obtenidas. Al menos en algunos casos, la presencia de las alteraciones detectadas es una mera coincidencia, no la causa del dolor. Más aún, hasta la mejor prueba de imagen es incapaz de identificar un simple espasmo muscular o una lesión de ligamentos, que probablemente son fuente del dolor en un porcentaje notable de pacientes. Como afirmara cierto neurocirujano, "el diagnóstico que se base exclusivamente en la resonancia magnética, sin el auxilio de pruebas clínicas objetivas, pudiera marrar la causa del dolor y el decidir la corrección quirúrgica constituir el primer paso hacia el desastre". En otras palabras, la exploración física es al menos tan importante como las pruebas de imagen; y la cirugía, en aquellos pacientes cuyo dolor sólo se asocia con resultados de imagen anómalos, resultar innecesaria cuando no perniciosa. Muchos médicos defienden la utilización de la tomografía computerizada y la resonancia magnética sólo en aquellos pacientes que por otras razones tengan ya que acudir al quirófano.

Para complicar más la situación, la mayoría de los pacientes con dolor lumbar agudo mejoran pronta y espontáneamente. De acuerdo con un estudio comparado, no hubo diferencias, en punto al tiempo de recuperación funcional, entre pacientes de fisioterapeutas, médicos de cabecera y cirujanos ortopedas. Sí variaban los costes de un caso a otro; los más económicos eran los médicos de cabecera y los más caros, los cirujanos. El consejo hipocrático *primum non nocere* (ante todo no dañar) debiera ser determinante. Al fin y al cabo es difícil mejorar el curso natural favorable del dolor lumbar agudo.

No hace todavía mucho tiempo, el reposo absoluto en cama constituía el pilar básico de la terapia. Tal prescripción se fundaba en la idea de que algunos pacientes mejoran, al menos de forma transitoria, cuando se echan, así como en la observación fisiológica de que la presión sobre los discos intervertebrales es mínima en decúbito prono. Pero el disco al que se le atribuía la causa pudiera muy bien ser inocente; además, la mayoría de los pacientes mejoran de forma espontánea. Ello no obstante, nadie se salvaba, diez años atrás, de una o dos semanas de estricto reposo. Su

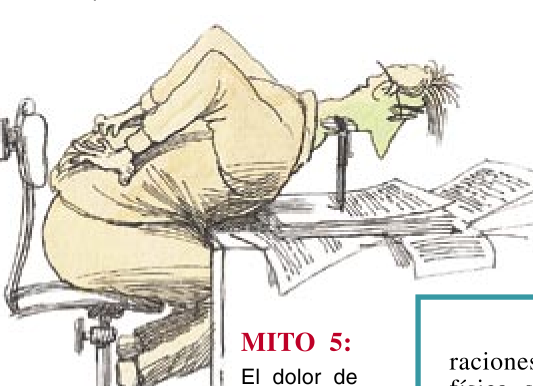
Mitos relativos al dolor lumbar

MITO 1:
Toda hernia discal precisa de corrección quirúrgica. Los cirujanos están de pleno acuerdo en quién debe entrar en el quirófano.

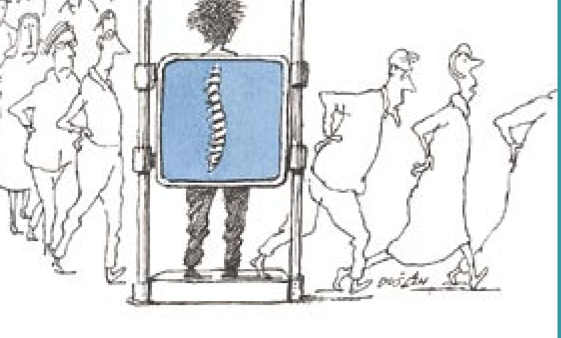
MITO 2:
La radiografía tradicional y las nuevas técnicas de obtención de imágenes (tomografía computerizada y resonancia magnética) permiten identificar la causa del dolor.

MITO 3:
Ante un dolor de espalda hay que descansar hasta que desaparezca.

MITO 4:
La mayoría de los episodios de dolor lumbar están causados por traumatismos o por levantar pesos.



MITO 5:
El dolor de espalda suele ser incapacitante.



MITO 6:
Toda persona con dolor lumbar debería hacerse una radiografía de columna.

MITO 7:
El reposo en cama constituye un elemento clave de la terapia.

pérdida de popularidad ha sido casi tan drástica como lo fue en su día la de las sangrías. Hoy se la considera anatema. La mejor opción ha pasado a ser la reanudación de las actividades habituales.

Por la época en que se indicaba el reposo en cama, mi grupo lo sometió a prueba a través de la comparación entre descansos de siete días y de sólo dos. Encontramos unos resultados sorprendentes. Ni a las tres semanas ni a los tres meses se apreciaban diferencias en lo concernientes al alivio del dolor, a los días de suspensión de la actividad, al desenvolvimiento diario o a la satisfacción con la atención médica. No hubo más diferencia que los días de baja laboral. Pero ni la intensidad del dolor, ni su duración ni las alteraciones detectadas en la exploración física sirvieron para poder calcular cuánto tiempo estaría de baja el paciente. El único factor que predecía la duración de la baja laboral era la recomendación de cuánto tiempo se debía guardar cama.

Otros estudios han confirmado y generalizado nuestras observaciones. No se gana más con cuatro días de reposo que con dos, o con ninguno incluso. Carece de base el miedo a que la actividad exacerbe la afección y retrase la recuperación. De hecho, los pacientes con dolor lumbar agudo que mantienen su ritmo de vida normal evolucionan mejor que los que recurren al reposo o al ejercicio inmediato. Por lo que se infiere de distintos trabajos, que las personas que persisten activas a pesar del dolor agudo experimentan luego menos dolor crónico (definido como tal el que se prolonga tres meses o más) y recurren menos a los servicios sanitarios que los pacientes que guardan reposo a la espera de que remita el dolor. (La ineficacia del descanso significa que cualquiera pueda reincorporarse de inmediato al trabajo. Las personas que desarrollan trabajos físicos exigentes no podrán reanudarlo con la celeridad que sí podrán quienes se ocupen en faenas más sedentarias. A menudo resulta recomendable empezar por tareas más ligeras hasta que se progrese en la recuperación.)

La investigación ha cuestionado también la eficacia de otros tipos de tratamiento pasivo. De acuerdo con ciertos estudios, la tracción sencillamente no funciona para afecciones lumbares. Más controvertida, hay indicios cada vez más claros de que la estimulación nerviosa eléctrica transcutánea, por débiles corrientes aplicadas a la zona dolorosa, reporta poco o ningún beneficio a largo plazo. De manera similar, la inyección de fármacos del grupo de la cortisona en las articulaciones compuestas no parece mejor que la inyección de una solución salina.

En cambio, sí va quedando palmario que el ejercicio forma parte importante de la prevención y el tratamiento de los problemas de espalda, sean agudos o crónicos. No hay un ejercicio específico que baste por sí mismo. Los programas eficaces combinan ejercicios aeróbicos para el mantenimiento físico general con entrenamiento específico encaminado a mejorar la potencia y resistencia de los músculos de la espalda.

Una revisión exhaustiva de estudios clínicos sobre ejercicio y dolor de

espalda descubrió que los programas de ejercicios regulares, si se iniciaban precozmente una vez había remitido el dolor, prevenían las recurrencias y reducían las bajas laborales en pacientes con dolor agudo. El poder preventivo del ejercicio era mayor que el de los programas educativos (por ejemplo, cómo levantarse) o los cinturones abdominales que limitan la movilidad de la columna. También se beneficiaban del ejercicio los pacientes con dolor crónico. Mas, a diferencia de los pacientes con dolor agudo, que a través de la reanudación de las actividades cotidianas dieron un resultado mejor que a través del ejercicio, los pacientes con dolor crónico mejoraban de forma sustancial realizando ejercicio incluso durante el dolor.

La incapacidad de la medicina para curar un alto porcentaje de pacientes con dolor de espalda ha hecho de esta afección uno de los motivos por los que los pacientes buscan un tratamiento alternativo, entregándose a los quiromasajistas o acudiendo a la acupuntura. Predomina, de lejos, la primera opción. Además, las pruebas revelan con consistencia creciente que la manipulación de la columna puede ser un remedio eficaz a corto plazo para quien atraviese un episodio de dolor de espalda. Otra cosa es a largo plazo. No tenemos base para asegurar que, a la larga, el quiromasajista u otros tratamientos alternativos ayuden a aliviar el dolor. La recuperación espontánea es, muy verosímilmente, la causa de que haya apasionados defensores de opciones terapéuticas tan dispares.

En el otro extremo del espectro se encuentra la cirugía. La mayoría de los especialistas coinciden en que debe indicarse la corrección quirúrgica si, además de una hernia discal definitiva en una prueba de imagen, se presentan el correspondiente síndrome doloroso, signos de irritación de alguna raíz nerviosa y falta de respuesta al tratamiento médico durante más de seis semanas. En estos pacientes, la cirugía puede ofrecer un alivio rápido del dolor. Por desgracia, otros pacientes que no reúnen estas condiciones también pasan por el quirófano, engrosando la larga lista de fracasos de la cirugía en el tratamiento del dolor lumbar. Si la hernia discal no es la causa del dolor, ¿por qué hemos de esperar que la intervención quirúrgica elimine el dolor?

Hacer del disco herniado el chivo expiatorio merece una reflexión más detenida. La hernia discal es una patología que se presenta con mayor frecuencia entre los 30 y los 50 años; los pacientes se quejan de dolores en la pierna, acompañados de una sensación de acorchamiento y de pinchazos. El dolor de espalda suele ser menos intenso. Una resonancia magnética positiva debe ir de la mano de una exploración física que busque la constelación de signos y síntomas pertinentes (irritación de raíces nerviosas, reflejos alterados, pérdida de la sensibilidad, fuerza muscular y movilidad de la pierna) para poder imputar de forma definitiva al disco el origen del dolor.

De acuerdo con trabajos recientes, incluso con hernia discal la recuperación espontánea sería la regla. A tenor de observaciones de sesiones de resonancias magnéticas, la parte herniada del disco acostumbra encogerse con el tiempo y alrededor de un 90 por ciento de los pacientes experimentan una mejoría gradual en un plazo de seis semanas. Por tanto, sólo un 10 por ciento de los pacientes con hernia de disco sintomática precisarían cirugía. Si se tiene en cuenta que la hernia discal no es la causa principal de dolor lumbar, la fracción real de candidatos a cirugía rondaría sólo el dos por ciento de los aquejados.

Pese a esos datos, la hernia de disco sigue siendo el principal motivo de cirugía de la espalda. Henrik Weber, del Hospital Ullevaal de Oslo, publicó en 1983 un estudio con 280 pacientes que planteaba serias dudas sobre el entusiasmo por la intervención quirúrgica. Aunque los pasados por el quirófano aliviaban su dolor antes que los sometidos a tratamiento clínico, el tiempo se encargaba de borrar las diferencias. A los cuatro años, y también al cabo de diez, los pacientes eran virtualmente indistinguibles. Por ello se antoja razonable otorgar preferencia a las distintas intervenciones médicas a la hora de tomar decisiones terapéuticas.

La estenosis espinal es el motivo principal de cirugía de la espalda en mayores de 65 años. Además, la corrección de la estenosis constituye una intervención en aumento. Pero las razones del incremento no están claras; podría reflejar la mayor capacidad de detección de la estenosis que permiten la tomografía computerizada y la resonancia magnética. Para nuestro infortunio, la justificación de la cirugía es en esta patología menos sólida que en la hernia discal. Nada tiene de extraño, pues, que existan grandes variaciones en los índices de cirugía de estenosis de canal. Por ejemplo, nuestro grupo detectó 30 intervenciones de estenosis por cada 100.000 habitantes mayores de 65 años en Rhode Island por 132 en Utah.

La cirugía de esta afección reviste, a su vez, mayor complejidad que en la hernia. En el disco herniado se resiente, por lo común, un solo nivel; en la estenosis de canal, varios. Además, sus pacientes son mayores y, por ende, más expuestos a las complicaciones de la intervención. Y, a propósito de la estenosis, se dispone de menos información sobre la efectividad comparada de las tratamientos quirúrgicos y médicos a largo plazo, que en lo que concierne a la hernia discal. Puesto que los síntomas de la estenosis suelen permanecer estables durante años y no hay que tomar una decisión urgente, deben tomarse en cuenta las preferencias del paciente.

Sería un error considerar trivial una patología que cada año sufren millones de personas y genera unos costes de billones de pesetas. La indiferencia colectiva, aunque insatisfactoria, sería la actitud general aconsejable. Casi todos experimentaremos su aguijón y debiéramos aceptar su presencia en nuestra vida. Una vez descartadas las afecciones más graves, será el individuo el que haga un esfuerzo para sobrellevar unas molestias que irán mejorando con los días o a las pocas semanas. La diversidad de opiniones ante la intervención quirúrgica debería mover a la prudencia. La voluntad del paciente tendría que contar bastante a la hora de decidir el tratamiento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PHYSICIAN VARIATION IN DIAGNOSTIC TESTING FOR LOW BACK PAIN. Daniel C. Cherkin, Richard A. Deyo, Kimberly Wheeler y Marcia A. Ciol en *Arthritis & Rheumatism*, vol. 37, n.º 1, páginas 15-22; enero 1994.

MAGNETIC RESONANCE IMAGING OF THE LUMBAR SPINE IN PEOPLE WITHOUT BACK PAIN. Maureen C. Jensen, Michael N. Brant-Zawadzki, Nancy Obuchowski, Michael T. Modic, Dennis Malkasian y Jeffrey S. Ross en *New England Journal of Medicine*, vol. 331, n.º 2, páginas 69-73; 14 de julio, 1994.

THE MINDBODY PRESCRIPTION: HEALING THE BODY, HEALING THE PAIN. John E. Sarno. Warner Books, 1998.

Microdiamantes

La utilidad de estos diminutos y enigmáticos cristales trasciende su interés industrial para contribuir al estudio de la formación de los diamantes

Rachael Trautman, Brendan J. Griffin y David Scharf

Desde hace más de tres mil años el diamante es un mineral sumamente apreciado. En la India se creía que poseía poderes mágicos concedidos por los dioses. Los caballeros de la Europa medieval llevaban en la batalla anillos con diamantes porque, suponían, les daban valor e impavidez ante el peligro.

Andando el tiempo, se demostró que el diamante era el material ideal para diversas aplicaciones industriales. El diamante, carbono cristalizado de increíble pureza (más del 99 %), es la sustancia más dura que se conoce. Capaz de rayar casi cualquier cosa, puede utilizarse como abrasivo y en herramientas de cortar, afilar y pulimentar. Por su elevada conductividad térmica —triplica la del cobre—, resulta óptimo para dispersar y disipar el calor en láseres de semiconductores y otros dispositivos electrónicos. Como la mayoría de estas aplicaciones pueden realizarse con cristales diminutos, el interés científico y técnico ha empezado a centrarse en microdiamantes, que miden menos de medio milímetro en cualquiera de sus dimensiones.

Antaño despreciados por su mínimo tamaño y los costosos procedimientos que requería su extracción, los microdiamantes han vuelto a ganar interés con el perfeccionamiento de las técnicas de extracción y el aumento de la demanda industrial.

Orígenes misteriosos

Se admite ahora que los ejemplares de tamaño comercial —macrodiamantes— se forman en el manto de la Tierra; los volcanes los transportan a la superficie. Pero el origen de los microdiamantes permanece envuelto en misterio. Tal vez sean meros cristales jóvenes, a los que faltó tiempo para crecer antes de llegar a la superficie. O a lo mejor se formaron en un entorno pobre en carbono, que abortó su crecimiento. Para algunos, los microdiamantes resultarían de procesos diversos, relacionados entre sí.

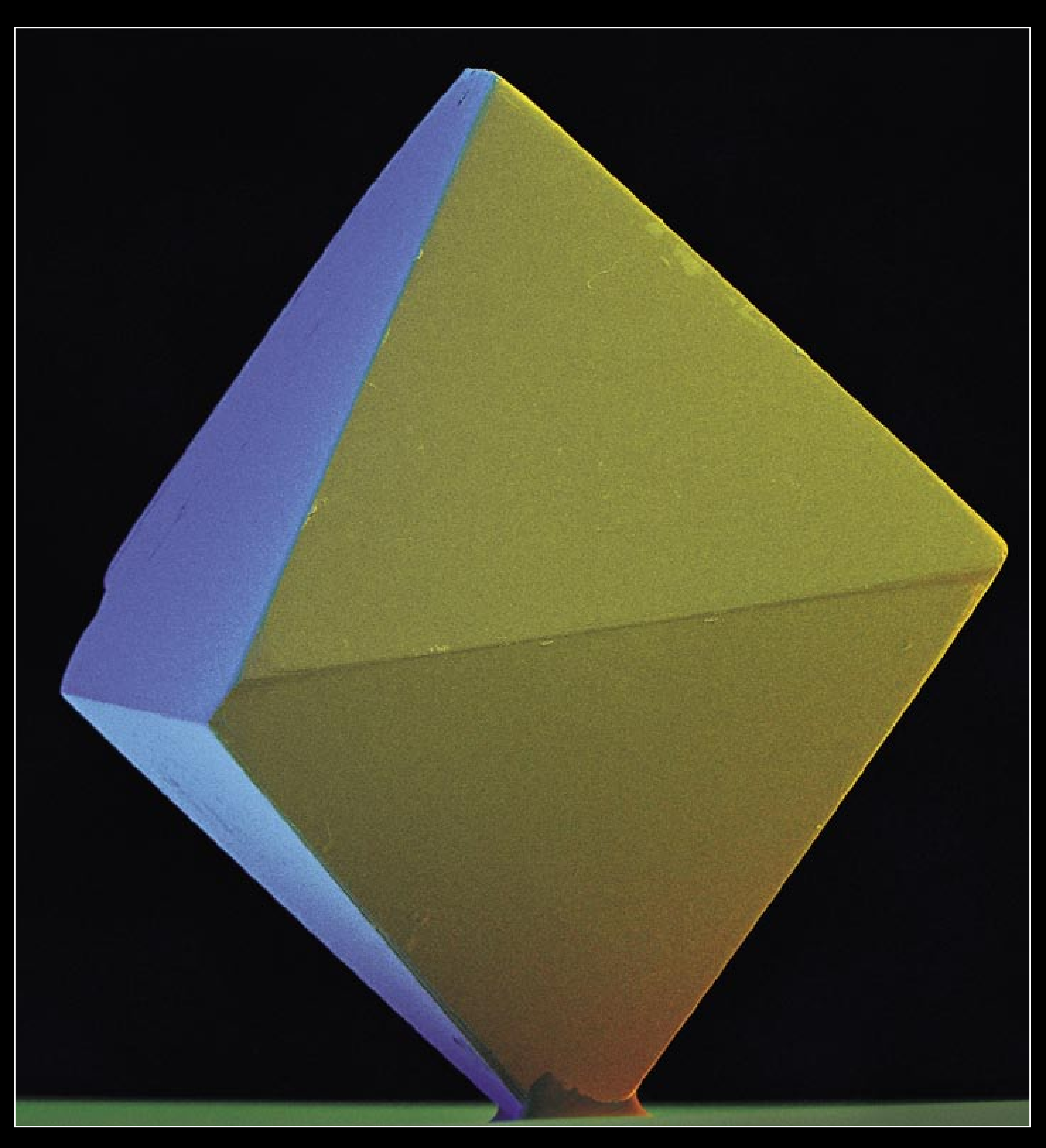
Raras veces se encuentran microdiamantes solos; suelen aparecer al lado de ejemplares normales. Incluso se han descubierto microdiamantes en los yacimientos de piedras mayores que han sufrido resorción: término general que denomina todo proceso, tal como la disolución o la corrosión, que reduce el tamaño del diamante y a menudo da lugar a un redondeo de los vértices y aristas. Cosa extraña, puesto que la relación del área superficial al volumen es mucho mayor en los tamaños pequeños que en los grandes; por ello la resorción, al achicar los diamantes, debería haber consumido todas las gemas de proporciones ínfimas.

De tan clamorosa paradoja se desprende un origen de los microdiamantes distinto del que conocen los diamantes mayores. Según una hipótesis, se forman microdiamantes dentro del magma ascendente, en el que ciertos procesos y condiciones limitan el crecimiento de los cristales de carbono. Pero otra teoría sostiene que el magma no es más que el vehículo de transporte y que, al igual que los diamantes corrientes, los microdiamantes se forman en el manto terrestre.

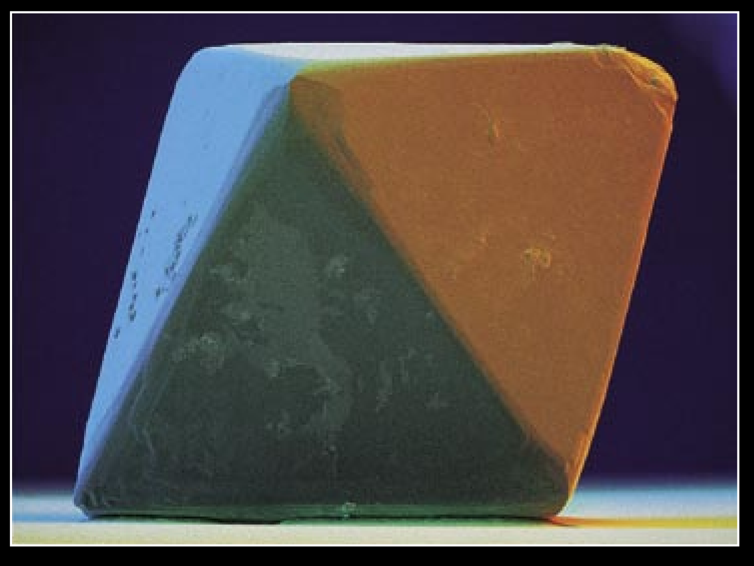
Para complicar la cuestión, se han descubierto microdiamantes que se dirían emergidos de la colisión de placas tectónicas en el seno de la corteza terrestre. Y también se han encontrado en meteoritos.

La investigación habrá de determinar la relación que existe entre los microdiamantes y sus parientes mayores. Cuando ésta se desentrañe, se comprenderá mejor la naturaleza del carbono, lo que redundará en una mayor eficacia y economía de las técnicas de extracción, y quizá de elaboración sintética, de este mineral.

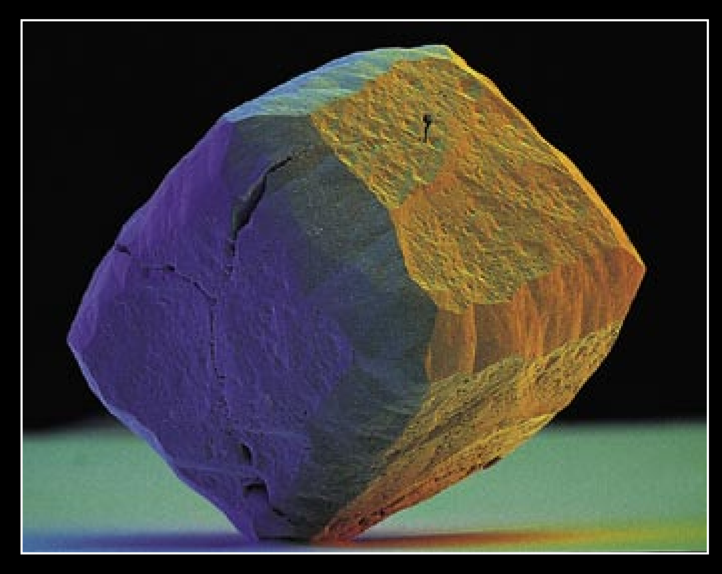
RACHAEL TRAUTMAN, BRENDAN J. GRIFFIN y DAVID SCHARF comparten el interés por los microdiamantes y la microscopía electrónica. Trautman estudia el origen y la génesis de microdiamantes en el centro de yacimientos minerales estratégicos de la Universidad de Australia. Griffin enseña e investiga en el centro de microscopía y microanálisis de esa misma institución superior. Scharf es un profesional de la microfotografía electrónica, cuyos trabajos han aparecido en enciclopedias, museos y revistas.



UN MICRODIAMANTE mide menos de medio milímetro (500 micrometros) en cualquier dimensión, con una masa menor de una centésima de quilate. (Compárese con el famoso diamante Hope, de 45 quilates.) El ejemplar mostrado tiene unos 400 micrometros de altura.



OCTAEDRO



CUBO

Diversidad de formas

Los expertos atribuyen el desarrollo del diamante a la adición de átomos en superficie; la velocidad de crecimiento, sostienen, condiciona la morfología del cristal. Si la temperatura, la presión y el contenido en oxígeno son favorables, la tasa de crecimiento —y la forma final del cristal— dependerá del carbono disponible.

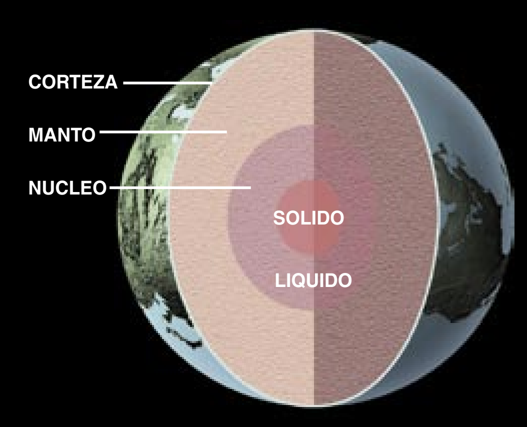
Los microdiamantes se presentan en formas monocristalinas de octaedros, dodecaedros, cubos, en maclas (placas triangulares planas unidas a pares) y en aglomeraciones irregulares. Además, a veces pueden desarrollarse caras octaédricas y cúbicas en el mismo cristal, lo que da origen a una forma mixta de ambos poliedros. Es frecuente que se fundan dos o más microdiamantes en crecimiento, produciéndose configuraciones raras y a menudo llamativas, como son los agregados de octaedros, dodecaedros o cubos, o agrupaciones amorfas.

Los octaedros representan la figura común de crecimiento. Y en la mayoría de los depósitos de microdiamantes, constituyen más de la mitad de las formas cristalinas observadas.

Menos frecuentes son los cubos, que raras veces poseen una estructura atómica cristalina u ordenada. Por el contrario, hay numerosos microdiamantes cúbicos que tienen una composición fibrosa, con crecimiento radial perpendicular a las caras del cubo. Este desarrollo peculiar, indicado por la textura de las caras, es consecuencia de la supersaturación de carbono en el medio de origen, que produce una cristalización sumamente rápida.

Los agregados implican, asimismo, un entorno rico en carbono, en el que se produce un crecimiento simultáneo en varios puntos vecinos. La proximidad hace que los cristales se fundan en una sola unidad de intercrecimiento complejo.

El origen del diamante



Tras extensas investigaciones se ha llegado a la conclusión de que los diamantes nacen en el manto terrestre (*izquierda*), a unos 150 o 200 kilómetros de profundidad. Unas rocas ígneas especiales, las kimberlitas y lamproítas, inicialmente en estado de fusión, transportan luego hacia arriba el mineral. En la superficie (*derecha próxima*), tales rocas aparecen como “conductos” o depósitos en zanahoria, principalmente en el interior de masas de tierra muy antigua denominadas cratones. El rendimiento de estos depósitos puede no ser mayor de un quilate por cada 100 toneladas métricas de roca excavada. Una interesante teoría sostiene que los microdiamantes —a diferencia de los diamantes normales— no se forman en el manto, sino en el magma de kimberlitas y lamproítas.

En cualquier caso, se requiere una presión enorme para formar un diamante. A la temperatura de 1600 kelvin se necesita una presión cercana a 50.000 atmósferas (*derecha, centro*), algo así como la que soportaría una placa de 12 centímetros cuadrados sobre la cual gravitara la Torre Eiffel invertida (*derecha extrema*). Si la compresión no alcanza esa cota, el carbono podría formar grafito en vez de diamante.

AGREGADO

CONDUCTO BALDIO

CONDUCTO DE KIMBERLITA DIAMANTIFERA

CONDUCTO DE LAMPROITA DIAMANTIFERA

DEPOSITO DE DIAMANTE

DIAMANTE

DIAMANTE

DIAMANTE

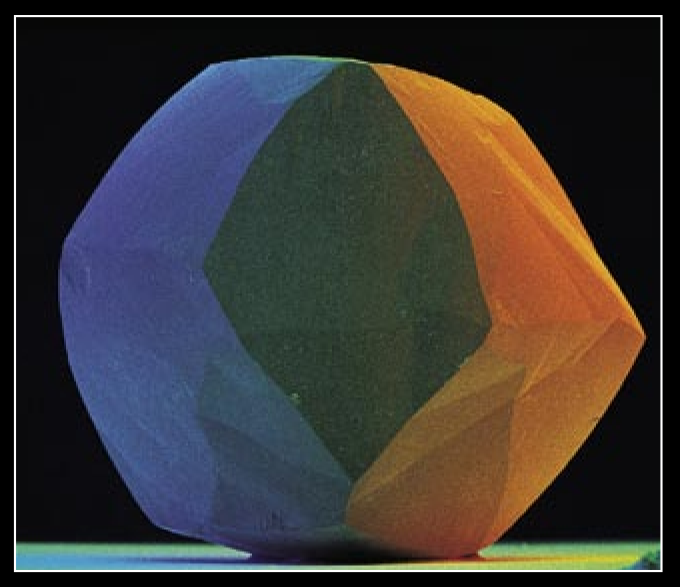
GRAFITO

PRESION (ATMOSFERAS)

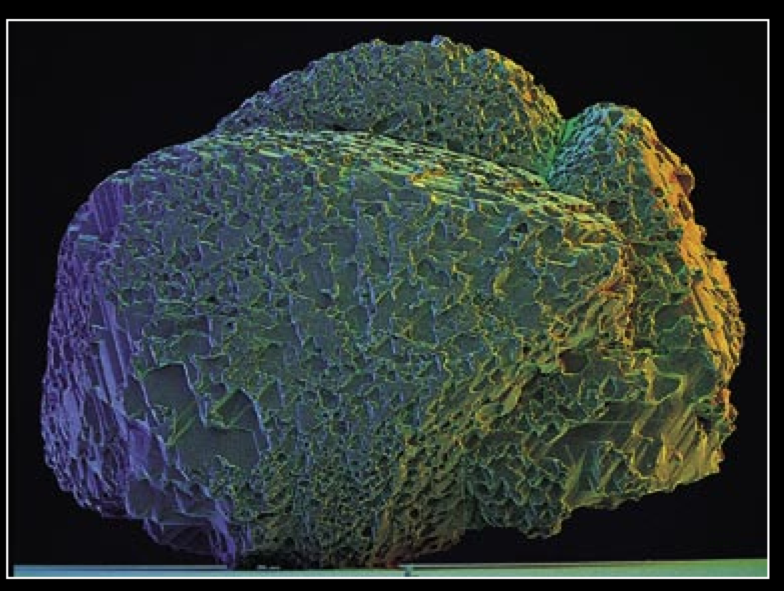
90.000
70.000
50.000
30.000
10.000

0 1000 2000 3000

TEMPERATURA (KELVIN)



DODECAEDRO formado por disolución de octaedro



AGREGADO OCTAEDRICO atacado por corrosión

Caras variables

Los procesos de resorción alteran la morfología de un microdiamante. La disolución convierte las caras planas del cristal en superficies curvas o redondeadas. Así, la forma dodecaédrica no procede del crecimiento original, sino que es el producto final de la disolución del octaedro. Entre los dos extremos, octaedros de aristas agudas y dodecaedros redondeados, se encuentran microdiamantes en una completa gama de figuras. Dado que siempre aparecen dodecaedros entre los microdiamantes, se cree que la disolución es un fenómeno común.

Cuando se disuelven microdiamantes en presencia de un agente corrosivo, el ataque puede producir superficies ásperas. A menudo la corrosión crea morfologías de diamante que en casi nada se parecen a sus formas originales. Las facetas lisas y planas de un agregado octaédrico se transforman en superficies esculpidas por la acción química.

A veces la corrosión da lugar a caras con estructuras peculiares, como son las que se asemejan a escalones. El ataque corrosivo puede revestir especial agresividad en aristas y vértices, alterando la forma global del cristal.

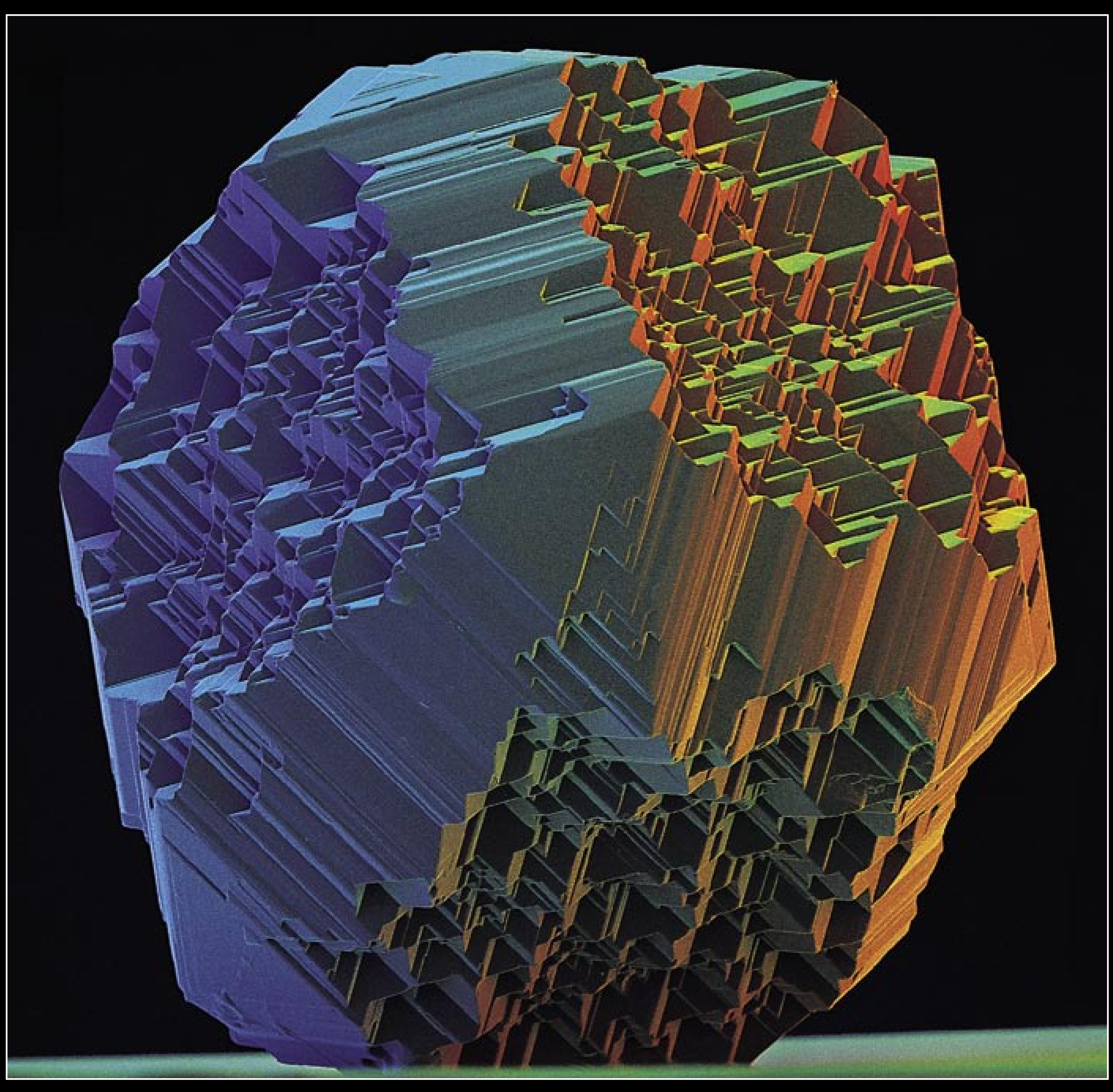
“Visión” de un mundo microscópico

Las imágenes de microdiamantes presentadas han sido obtenidas por David Scharf con un microscopio electrónico de barrido (SEM). En este instrumento la iluminación se consigue por haces de electrones, enfocados por lentes magnéticas, que exploran la muestra según un patrón reticulado (similar al utilizado en las pantallas de televisión). Al incidir el haz sobre la muestra, se desprenden electrones (secundarios) de su superficie. Estas partículas de carga negativa son luego atraídas a la polaridad positiva de un detector, donde se amplifican y convierten en señal de vídeo.

Los microdiamantes aparecen opacos en las imágenes porque los cristales no son transparentes a los electrones. El color proviene de un sistema desarrollado y patentado por Scharf —el sintetizador de color multidetector— que utiliza tres detectores de electrones (en vez del único acostumbrado), separados para captar tres ángulos de iluminación distintos. A cada detector se le asigna un color diferente (arbitrario) para producir los diversos colores expuestos.



David Scharf



OCTAEDRO atacado hasta aproximarse a cubo

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIAMONDS. Segunda edición. Eric Bruton. NAG Press, Londres, 1978.

DIAMOND. Gordon Davies. Adam Hilger, Bristol, 1984.

A COMPARISON OF THE MICRODIAMONDS FROM KIMBERLITE AND LAMPLOITE OF YAKOUTIA AND AUSTRALIA. R. L. Trautman, B. J. Griffin, W. R. Taylor, Z. V. Spetsius, C. B. Smith y D. C. Lee en *Proceedings of the Sixth International Kimberlite Conference*, vol. 2: *Russian Geology and Geophysics*, n.º 38. Allerton Press, 1997.

THE NATURE OF DIAMONDS. Preparado por George E. Harlow. Cambridge University Press, 1998.

La epidemia de fiebre amarilla de Filadelfia de 1793

Fue una de las primeras grandes epidemias de la enfermedad en los Estados Unidos y devastó la entonces capital de América. Pero de ese episodio se extrajeron lecciones duraderas para la ciudad y el país

Kenneth R. Foster, Mary F. Jenkins y Anna Coxe Toogood



Ahora son raras en Occidente las epidemias que en poco tiempo matan a muchas personas. Pero un siglo atrás, tales desastres ocurrían con relativa frecuencia, causando estragos en una población desconcertada que ni siquiera acababa de comprender su origen. Si dejamos de lado la tragedia humana que estos episodios constituían, hemos de admitir que algunos tuvieron repercusiones de largo alcance para las naciones. Un caso dramático se produjo en 1793, cuando una de las más tempranas y graves epidemias de fiebre amarilla de los Estados Unidos estalló en Filadelfia, a la sazón capital del país.



Filadelfia era por entonces también la ciudad más poblada y cosmopolita. Pero ni su rango ni su prosperidad ofrecían suficiente protección. Entre el verano y el otoño, la décima parte de su población, unas cinco mil personas, murió.

Los problemas comenzaron con la llegada de refugiados franceses que huían de una sangrienta rebelión de esclavos en Santo Domingo (la actual Haití). Desembarcaron en las orillas del río Delaware, que bordeaba el lado este de la ciudad. Además de informar sobre el conflicto, hablaban de una misteriosa fiebre pestilencial que diezmaba algunas islas de las Indias Occidentales. En julio, la enfermedad estalló en Filadelfia.

Los primeros en caer fueron familias obreras instaladas en la ribera del Delaware. Padecieron fiebre alta y hemorragias, sus ojos y piel se tiñeron de amarillo y devolvieron vómitos negros. Muchos murieron a causa de hemorragias internas tras varios días de enfermedad.

Estas primeras víctimas escaparon a la atención de los representantes de la clase médica, quizá por su situación marginal, social y geográfica, en la ciudad. Por fin, el 19 de agosto, Benjamin Rush, médico eminente, tras ver varios casos similares, concluyó que los pacientes sufrían "fiebre amarilla biliosa remitente". Rush, que frisaba la cincuentena, se había encontrado con esta enfermedad sólo una vez, en su período de formación. Advirtió en seguida que se trataba de una epidemia y tomó medidas para combatirla.

Rush gozaba de una buena posición para movilizar a las autoridades ante el desastre. Era un renombrado profesor de la Universidad de Pensylvania y uno de los fundadores de la prestigiosa Facultad de Medicina de Filadelfia. Patriota y firmante de la Declaración de Independencia, destacaba además por su filantropía y magisterio. Era un hombre decidido y poseía una fuerte personalidad.

1. VICTIMA de la fiebre amarilla ayudada a subir al carruaje para su traslado al hospital según un grabado dedicado a la epidemia de Filadelfia de 1793. Quien le ayuda es un hombre de negocios, Stephen Girard. En el fondo, un hombre cubre su boca para evitar el contagio de la enfermedad, la cual se pensaba que se diseminaba por el aire. En la parte superior de la página anterior aparece un dibujo de *Aedes aegypti,* el mosquito transmisor del virus de la fiebre amarilla.

Matthew Clarkson, alcalde de Filadelfia, consultó presionado por Rush a la Facultad de Medicina sobre las medidas de higiene pública que debían recomendarse a la población para luchar contra la fiebre. El informe de esta institución, redactado por Rush, se publicó el 26 de agosto. En él se sustentaba la teoría, prevaleciente en la época, de que la enfermedad era contagiosa y se difundía a través de vapores pútridos, por lo que se recomendaba a los ciudadanos que evitaran el contacto con los enfermos, que respiraran a través de paños impregnados de alcanfor o vinagre y que quemaran pólvora para purificar el aire. También se proponía establecer un hospital para atender a los afectados indigentes, demasiado pobres para pagar la asistencia domiciliaria, preferida por la mayoría de la gente. Para evitar la alarma de la población, el informe recomendaba que callaran las campanas de las iglesias, que no habían dejado de anunciar funerales sin cuento.

Sabemos hoy que la fiebre amarilla es una enfermedad vírica transmitida por la hembra del mosquito de la especie *Aedes aegypti*. Los problemas de Filadelfia se originaron a partir de mosquitos *A. aegypti*, portadores del virus de la fiebre amarilla, que viajaron como polizones en los barcos de refugiados que llegaron de Santo Domingo. Una vez que los insectos infectados esparcieran el virus entre la población, otros *A. aegypti* sin infectar extrajeron el agente vírico de la sangre de los enfermos y lo inocularon en nuevas víctimas.

A tenor del estado de las ideas médicas de finales del XVIII, entraba dentro de lo razonable pensar que la fiebre amarilla se difundía por el aire. No se conocía nada sobre los microorganismos y la transmisión de la enfermedad. Hasta el año 1900 no se supo que los mosquitos transmitían la fiebre amarilla al hombre. Fue cuando Walter Reed y sus colaboradores comprobaron ese fenómeno, ya supuesto por el médico cubano Carlos Finlay. En consecuencia, muchos médicos, incluido Rush, sustentaban la teoría medieval que defendía que las enfermedades eran causadas por las impurezas del aire, sobre todo por vapores provenientes de materia vegetal en putrefacción.

En Filadelfia, los defensores de las teorías ambientalistas de la enfermedad tenían motivos para preocuparse. La ciudad carecía de un sistema de alcantarillado eficaz. Basuras domésticas e industriales contaminaban el



2. BENJAMIN RUSH, médico eminente, desencadenó una agria controversia al defender el recurso generoso a la sangría para "curar" la fiebre amarilla. Los instrumentos que se muestran, de alrededor de 1790, son como los que Rush y sus seguidores pudieron haber usado. Los médicos discrepantes defendían el reposo, la limpieza, el vino y la corteza del Perú.

suministro de agua. Humos tóxicos, procedentes de curtidurías, destilerías, fábricas de jabón y otras industrias envenenaban el aire. Desechos de animales cubrían las orillas del Delaware y las calles, sobre todo High Street (hoy Market Street) donde se encontraba el mercado. El mismo Rush atribuyó la enfermedad a los vapores emanados de un cargamento de café que se había echado a perder en su viaje desde las Indias Occidentales y que se hallaba abandonado y putrefacto en un muelle. Ante esta grave situación, el alcalde Clarkson volvió a publicar, ante su incumplimiento, las leyes municipales que ordenaban recoger la basura dos veces por semana y mandó limpiar las calles y los mercados de la ciudad.

Otros médicos, con William Currie al frente, pensaban que los refugiados enfermos de Santo Domingo habían traído consigo la fiebre y la habían diseminado mediante contacto físico. Ellos abogaban por una severa cuarentena. El alcalde intentó complacerles ordenando que los pasajeros que llegaran a la ciudad, así como sus pertenencias, quedaran aislados durante dos o tres semanas; sin embargo, a lo largo de buena parte de la epidemia, la ciudad careció de recursos para ejecutar la ordenanza. El mismo Currie sugirió que la combinación de un tiempo muy seco propio del verano con vapores pútridos había avivado la enfermedad al destruir el "gas oxígeno o aire puro" de la ciudad.

KENNETH R. FOSTER, MARY F. JENKINS y ANNA COXE TOOGOOD comparten un profundo interés por la historia de Filadelfia. Foster enseña bioingeniería en la Universidad de Pennsylvania. Jenkins, su mujer, trabaja en el Parque Histórico Nacional Independence de Filadelfia, institución donde Toogood prestó sus servicios de historiador durante más de treinta años.

Cunde el pánico

En correspondencia con ello, Rush calculaba que, sólo en agosto, se habían producido 325 bajas. Al final de ese mes, mucha gente que podía permitirse el abandonar Filadelfia lo hizo, incluidos algunos de los ochenta médicos de la ciudad. (Entre los profesionales que se quedaron se encontraba John Todd, un abogado que se encargó de la oleada de problemas legales surgidos con la mortandad desencadenada. Todd contrajo la fiebre y murió. Un año después su viuda, Dolley, se casó con James Madison, miembro del Congreso, quien andando el tiempo se convirtió en el cuarto presidente de los Estados Unidos; su mujer, Dolley Madison, pasó a ser Primera Dama).

Los ciudadanos que se quedaron, pobres en su mayoría, siguieron los consejos de la Facultad de Medicina y pusieron en práctica otras "medidas" de protección. Llevaban bolsas con alcanfor o cuerdas impregnadas de alquitrán alrededor del cuello, llenaban de ajos sus bolsillos y zapatos, se empapaban de vinagre, disparaban con pistolas en sus salas de estar y encendían hogueras en las calles.

La gente empezó a abandonar a sus cónyuges en las calles. Niños hambrientos y asustados, cuyos padres habían muerto a causa de la fiebre, vagaban por la ciudad. High Street, la calle del mercado, permanecía vacía, otros comercios cerraron, las iglesias y las casas de reunión de los cuáqueros perdieron a los miembros de su congregación. El gobernador de Pennsylvania, Thomas Mifflin, se marchó el día 6 de septiembre, dejando la crisis en manos del alcalde Clarkson. Una semana después del abandono de Mifflin, casi todas las autoridades habían huido. La economía se desplomó.

Entre las prioridades de Clarkson antes y después del éxodo, se encontraba el suministrar cuidados a los afectados, pero sus deseos se veían limitados por el miedo al contagio. A finales de agosto, muchas instituciones, entre ellas el hospital de Pennsylvania, el lazareto municipal y el asilo cuáquero, ya no admitían más enfermos de fiebre amarilla; había que proteger, aducían, al resto de los ingresados. En respuesta a semejante situación, los Vigilantes y Guardianes del Pobre (una institución municipal) intentaron conseguir el circo John Rickett, situado a las afueras de la ciudad, para reconvertirlo en hospital, pero los vecinos, enfurecidos, por poco lo queman. El 31 de agosto, la misma institución instaló un hospital en Bush Hill, un edificio entonces deshabitado y ocupado un año antes por el vicepresidente John Adams y su mujer. Bush Hill distaba un kilómetro y medio del centro de la ciudad, por lo que estaba alejado lo suficiente para no provocar la oposición de los residentes en la ciudad, pero demasiado lejos también como para que los médicos, sitiados, lo visitaran con regularidad.

Al principio, las condiciones de vida en el improvisado hospital eran pésimas. Lo cuenta un testigo de la época. "Dibuja un espantoso retrato de la miseria humana, jamás visto. Un grupo de enfermeras y ayudantes, disoluto y abandonado, ... despilfarran

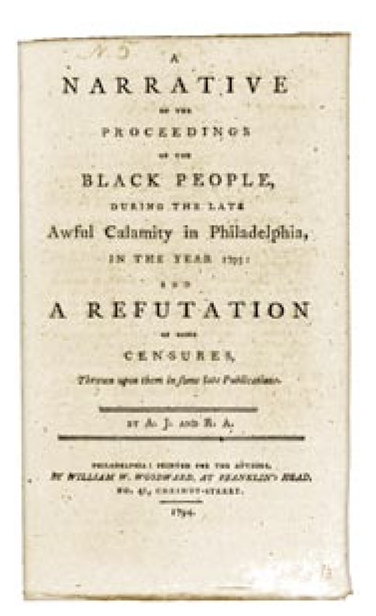
las provisiones y enseres preparados para los enfermos, quienes... se encuentran enteramente desasistidos. Agonizantes y muertos se mezclan de forma indiscriminada. Los excrementos y otras evacuaciones de los enfermos se dejan sin recoger, en el estado más humillante que imaginarse pueda.”

El 10 de septiembre, el alcalde Clarkson buscó voluntarios para remediar las dificultades que el cuidado de los enfermos ocasionaba al hospital y a la ciudad. Una docena de hombres trabajaron durante cuarenta y seis días consecutivos con el fin de normalizar la situación. Recaudaron dinero, compraron suministros para el hospital y otros artículos necesarios para los pobres, alquilaron una residencia para un orfanato y contrataron al personal necesario. Fueron puerta por puerta para enterarse de fallecidos y moribundos, para rescatar a los niños huérfanos. Fue una labor magnífica y titánica, enfrentados a una enfermedad que la mayoría de los médicos pensaba que podía contraerse con facilidad mediante la respiración o por contacto personal. Tres de estos abnegados voluntarios murieron de fiebre.

Muchos afroamericanos arriesgaron también su vida. Poco antes de la convocatoria del alcalde, Rush había suplicado asistencia de enfermería a la comunidad afroamericana, constituida por unas 2500 personas. En su



3. MANIFESTACIONES TARDIAS de la fiebre amarilla son la hemorragia nasal profusa y el vómito negro (*como se ve en la almohada*). Así aparecen en este dibujo de 1820 que forma parte de una serie que ilustraba la marcha de la enfermedad. La serie, perteneciente a una publicación francesa, incluye alguna de las primeras imágenes en color de las fases de la enfermedad.



A

NARRATIVE

PROCEEDINGS

BLACK PEOPLE,

DURING THE LATE

Awful Calamity in Philadelphia,

IN THE YEAR

AND

A REFUTATION

CENSURES,

BY A. J. AND R. A.



4. ABSALOM JONES fundó junto con Richard Allen la Sociedad Africana Libre. Ambos y William Gray procuraron que la sociedad aportara enfermeras afroamericanas en los días de la epidemia. Su labor fue muy elogiada, aunque más tarde Mathew Carey, el principal historiador de la epidemia, acusó a algunas de aprovecharse de la situación y de robar. Llenos de cólera, Jones y Allen rechazaron en un escrito semejante imputación (*a la izquierda*), libro que se convirtió en la primera publicación política afroamericana.

mayoría eran libres (aunque vivían en la pobreza), porque Pennsylvania había abolido la esclavitud. Seis años antes, dos líderes del grupo, Absalom Jones y Richard Allen, habían fundado la Sociedad Africana Libre, el primer servicio de autoayuda organizado por negros en los Estados Unidos. Rush, abolicionista confeso, había estrechado relaciones con ambos personajes y era un firme partidario de la sociedad. De diferentes informes que había leído, Rush extrajo la conclusión de que los negros eran inmunes a la fiebre amarilla y, por tanto, podían ayudar a los enfermos. (Al final comprobó que estaba equivocado; más de trescientos afroamericanos murieron en la epidemia, en una proporción cercana a la del resto de la población.)

La sociedad estuvo de acuerdo en proporcionar colaboradores. Allen y William Gray, miembro de la sociedad, organizaron la contratación de las enfermeras y las distribuyeron por los hogares. Otros componentes de la comunidad trasladaban pacientes a los hospitales y enterraban a los muertos. A petición de la sociedad, el alcalde liberó a varios presos negros de la cárcel de Walnut Street para que trabajaran en el “hospital contagioso”.

El 18 de septiembre Rush escribió a su mujer (quien se había quedado en la ciudad con los hijos del matrimonio): “Los padres abandonan a sus hijos en cuanto se infectan; en cualquier habitación que entres no ves más que a un hombre o mujer negros cerca del enfermo. Mucha gente arroja a sus padres a la calle a la primera jaqueca.”

Cuando las enfermeras reclutadas por la sociedad comenzaron a responsabilizarse de los enfermos en la ciudad, dos miembros excepcionales del comité del alcalde, Stephen Girard y Peter Helm, se hicieron cargo de Bush Hill. Girard, por entonces un obscuro comerciante, era un inmigrante francés que más tarde se hizo famoso como financiador de la guerra de 1812 y fundador del Banco Girard y del Colegio Girard para huérfanos. Helm era un tonelero de ascendencia alemana.

Girard aceptó la responsabilidad de trabajar dentro del centro, mientras Helm lo hacía en el exterior y en las dependencias anexas. Ambos se entregaron con ahínco a su trabajo diario, hasta que la epidemia terminó a finales de año. Girard impuso orden y limpieza en la institución y aseguró una atención cuidadosa a cada paciente. Helm restableció el suministro de agua a los edificios, construyó ataúdes, consiguió más espacio para el hospital y supervisó el ingreso de los pacientes, que incluía el colocarlos en zanjas en el césped para protegerlos de los vapores mientras esperaban su cama en el hospital.

Girard se había familiarizado con la fiebre amarilla durante sus viajes por las Indias Occidentales. Conven-

ció al comité del alcalde para que contratara al médico Jean Devèze, uno de los refugiados de Santo Domingo. Devèze había tratado la enfermedad en el ejército francés y se había convertido en una autoridad mundial sobre el tema. Defendía el método francés: reposo en cama, limpieza, vino y tratamiento con corteza del Perú (que aporta quinina, utilizada hoy en día para el paludismo pero no para la fiebre amarilla). En Bush Hill, Girard suministró generosamente vino procedente de sus propias bodegas.



To the Citizens.

A SUPPLY of old shirts, shifts and linen, of any kind, is much wanted at the Hospital, for the sick.

Those who have any to spare, are requested, to send them to the state-house, where a person is appointed to receive them.

MATTHEW CLARKSON,
Mayor

5. EN BUSH HILL (*arriba*) habían vivido el vicepresidente John Adams y su esposa; durante la epidemia se convirtió en hospital de pobres. Para subvenir a las necesidades del centro, el alcalde publicó un bando en el que pedía donativos (*abajo*).

Polémica sobre el tratamiento

Pero los médicos locales discreparon del nombramiento de Devèze y cuatro abandonaron el hospital. Por una parte les molestaba perder su autoridad médica en Bush Hill; por otra, habían sido educados en la tradición escocesa e inglesa, muy diferente de la francesa. Además, Devèze se encontraba en el polo opuesto de Rush y sus defensores, por lo que se produjo una agria polémica sobre el mejor tratamiento posible.

Acordes con la enseñanza tradicional recibida, Rush y muchos de sus contemporáneos creían que el cuerpo contenía cuatro humores (sangre, flema, bilis negra y bilis amarilla). En ese marco, el tratamiento debía tender a restablecer el equilibrio corporal mediante laxantes y eméticos (para causar el vómito), sangrías y sudoríferos.

Rush se convenció muy pronto de que una combinación de estas medidas podía curar, específicamente la sangría unida a la administración de una mezcla mercurial de calomelanos y jalapa. "A principios de septiembre, preferí las sangrías cortas y frecuentes sobre las copiosas", escribió en 1794 al dar cuenta de la epidemia, "pero hasta el apogeo de la epidemia y su finalización, no veo inconveniente en extraer una pinta, incluso 20 onzas de sangre cada vez. A muchas personas les extraje 70 u 80 onzas en cinco días y a unas pocas, una cantidad mucho mayor".

Con el tiempo, Rush se enrocó. A él, alegaba, no se le había muerto nadie a quien hubiera sangrado siete o más veces. Montó una cuidadosa campaña, a través de su correspondencia privada y de cartas a los editores de los periódicos, con el fin de que los médicos no escatimaran la lanceta. Criticaba a los médicos que alababan los beneficios de la flebotomía pero se mostraban remisos a practicarla. Dirigía sus mayores diatribas contra Devèze y los contados galenos que se atrevían a denunciar en público el peligro de una drástica sangría.

Conforme el tratamiento de Rush se iba radicalizando, sus colegas médicos empezaron a retirarle su lealtad. Pese a lo cual no dejaban de acudir a la consulta de Rush ciudadanos prominentes de Filadelfia. John Redman, mentor de Rush y a sus 71 años decano de los médicos de Filadelfia, se sometió al tratamiento de Rush y sobrevivió. Caspar Wistar, un respetado profesor de anatomía, también se recobró. Del círculo inmediato de Rush, murieron tres de sus aprendices, así como su propia hermana. Rush y otros dos aprendices contrajeron la fiebre amarilla, pero se repusieron tras serles aplicado su tratamiento.

Los historiadores saben que ni el método de Rush ni el de Devèze podían curar a sus pacientes. Con o sin intervención, la fiebre amarilla seguía un curso variable, matando a unos, perdonando a otros. Como la mayoría de las enfermedades víricas, carece prácticamente de tratamiento hoy en día y la terapia consiste en mantener a los pacientes cómodos e hidratados. El protocolo "suave" de Devèze, menos perjudicial que el de Rush, pudo reforzar las defensas de los pacientes para combatir el virus. Pero sería injusto afrentar a Rush por sus decisiones. Su modo de actuar era tan sólo una versión agresiva de la terapia común, basada en las teorías médicas de su época.

La epidemia acabó por sí misma en noviembre con la llegada del frío, letal para los mosquitos. Carente entonces la ciudad de registros sanitarios, nos quedamos sin conocer la cifra exacta de víctimas. Mathew Carey, convertido en historiador oficial de la epidemia, habló de 4041 muertos entre un total de 45.000 habitantes. Para ello contó el número de tumbas recientes de los cementerios de la ciudad y consultó los libros parroquiales y otras fuentes. Con toda probabilidad la cifra fue más alta. En un informe publicado meses después de la epidemia, el propio Carey sugería que los fallecidos sobrepasaban los 5000.

De los médicos que permanecieron en la ciudad, diez pagaron su entrega con la vida. Unos veinte mil ciudadanos abandonaron su hogar; una parte de ellos acabó en cuarentena o escarnecida en los caminos por una población atemorizada, a extramuros de la metrópoli. Filadelfia volvería a padecer otras epidemias de fiebre amarilla en 1797, 1798, 1799, 1802, 1803 y 1805. También se declararon epidemias varias veces en otras zonas de los Estados Unidos, sobre todo en el sur, donde medra *A. aegypti*. El último brote importante se dio en Nueva Orleans en 1905.

Para Rush, los sucesos de 1793 representaron el apogeo y el ocaso de su carrera. Al principio, su dedicación a los afligidos le convirtió en un héroe popular; veía a ciento veinte enfermos cada día. Pero se mostraba demasiado seguro de sí mismo, era intolerante con las terapias alternativas e incapaz de soportar una crítica. Al imponer su voluntad y politizar a la comunidad médica, levantó una barrera formidable contra tratamientos

más lúcidos de otros médicos. “Las diferentes opiniones sobre el tratamiento producen una gran inquietud”, escribió Henry Knox, secretario de guerra, al presidente George Washington el 15 de septiembre de 1793, “pero Rush no soporta nada que le haga sombra”.

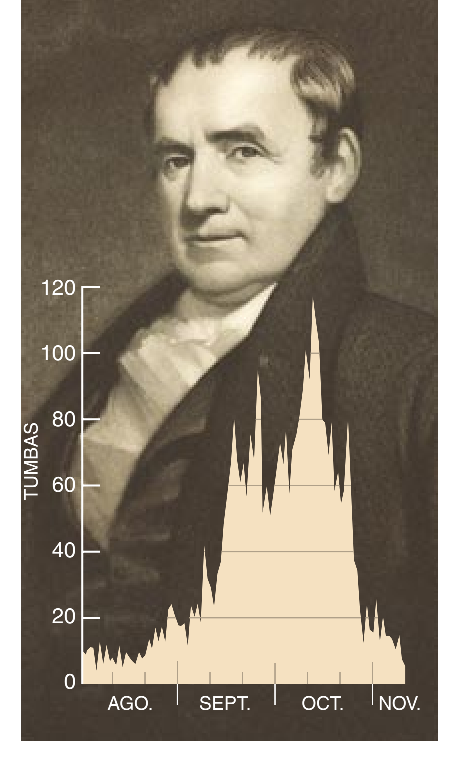
Mas la intolerancia de Rush y su tratamiento radical acabaron por minar su reputación. Encolerizado por los desaires manifiestos de otros médicos, se dio de baja en el Colegio de Médicos poco después de la epidemia. Sin doblegarse, se dedicó a tratar a las víctimas de las epidemias de fiebre amarilla que se declararon posteriormente en Filadelfia, practicando sangrías más radicales incluso que antes. En 1797 su antiguo y leal discípulo Philip Physick sobrevivió a veintidós sangrías y a una pérdida de 176 onzas de sangre.

La epidemia de 1793 supuso para Filadelfia la creación al año siguiente del servicio municipal de sanidad, uno de los primeros del país. Puede atribuirse también indirectamente a la epidemia el que en 1901 Filadelfia tendiera la primera red municipal de conducción de agua en una gran ciudad americana. Las autoridades sanitarias daban por supuesto que la eliminación de la suciedad podía ayudar a prevenir la fiebre amarilla y otras enfermedades; la red de canalización formaba parte de la limpieza general.

La entrega de la comunidad afroamericana sirvió para mejorar allí las relaciones entre los negros y los blancos, en un momento en que la tensión racial aumentaba en el resto del país. Durante la epidemia, la resuelta actuación de los negros ante el lecho de los moribundos les valió el reconocimiento general. En 1794, la gratitud hizo que los líderes de la ciudad y un clero blanco inicialmente reticente cooperaran con la comunidad afroamericana y se fundaran las primeras iglesias en todo el país de fieles negros y regidas por ellos. La Iglesia Episcopaliana Africana de St. Thomas y la Iglesia Mother Bethel A. M. E., nacidas entonces, mantienen en nuestros días una activa congregación.

Repercusiones generales

Pero no todo fue de color de rosa. Carey acusó a algunos negros de aprovecharse de la situación, de exigir precios abusivos por sus servicios y de acciones de pillaje en las casas de los pacientes a quienes cuidaban.



6. MATHEW CAREY calculó las bajas de la fiebre amarilla. Recurrió para ello, entre otros medios, al recuento de tumbas recientes (*gráfico*). Cifró en 4041 el número de muertos, aunque más tarde elevó el guarismo a los cinco mil.

En el que es considerado por algunos expertos como el primer impreso político afroamericano del país, Jones y Allen hicieron pública una respuesta enérgica, aunque contenida, a través de la cual describían con verismo realista las sórdidas condiciones en que las enfermeras realizaban su labor, sin ayuda y rechazando a veces cualquier compensación.

Las repercusiones de la epidemia de 1793 se extendieron más allá de Filadelfia. En medio del episodio, Ann Parish, una dama rica y cuáquera, fundó una institución que permitía a las mujeres que habían enviudado mantener unidas a sus familias (mientras hilaban en la Casa Industrial, otras mujeres cuidaban a sus hijos). Este programa se convirtió en un modelo de filantropía innovadora para otras ciudades que más tarde sufrieron epidemias de fiebre amarilla. Al propio tiempo, y fruto de la controversia promovida por Rush, los métodos franceses de curación fueron mejor conocidos por los médicos y muchos de ellos empezaron a cuestionar las ventajas de una sangría masiva.

A lo largo de la costa, las ciudades acordaron medidas de salud pública que incluían estaciones de cuarentena para barcos extranjeros. Más aún: fue todo un movimiento sanitario el que se formó y propagó en el siglo XIX. En su onda, varias ciudades canalizaron la distribución de agua y establecieron servicios frecuentes de limpieza de las calles.

La epidemia, que se desarrolló en la capital del país en un momento crucial para el mismo, tuvo importantes repercusiones políticas. Antes de que llegara la fiebre amarilla, había en la capital un sentimiento colectivo de ayuda al gobierno revolucionario francés en la guerra que había declarado a Gran Bretaña, los Países Bajos y España. Edmond Charles Genêt, enviado por Francia para avivar el apoyo popular a la guerra, encontró una multitud entusiasta en Filadelfia, pero recibió una fría acogida por parte del presidente Washington.

John Adams, el segundo presidente de los Estados Unidos, recordó más tarde que “diez mil personas en las calles de Filadelfia, día tras día, amenazaban con arrastrar a Washington fuera de su casa y desencadenar una revolución si el gobierno no declaraba la guerra alineándose con Francia y en contra de Inglaterra... Nada sino la fiebre amarilla... pudo salvar a los Estados Unidos de una revolución radical en la gestión del Estado”.

La catástrofe médica enfrió la orgía política. Cuando la epidemia terminaba llegaron a América noticias de los excesos cometidos por el gobierno francés y la opinión pública se volvió contra Francia en favor de la neutralidad.

Tras reaparecer varias veces, la fiebre amarilla disminuyó de forma gradual en los Estados Unidos a finales del siglo XIX. Continuó azotando algunas zonas tropicales, sobre todo en Sudamérica y en el Africa subsahariana.

La caída de la enfermedad en los Estados Unidos comenzó mucho antes de la introducción de una vacuna eficaz en los años treinta del siglo XX. (La vacuna, obligatoria para soldados y viajeros, resulta, por desgracia, demasiado cara para quienes viven en las zonas propicias para el desarrollo de la epidemia.) El establecimiento de cuarentenas y el abastecimiento municipal de agua, que redujo las zonas de cría de los mosquitos, desempeñaron probablemente un papel decisivo en la terminación de las epidemias en los Estados Unidos, aunque sin minusvalorar la mejoría de las condiciones sanitarias y otros factores. Esta disminución forma parte de un patrón más amplio en el cual las tasas de mortandad de muchas enfermedades



infecciosas decayeron a lo largo del siglo XIX.



En las regiones tropicales, el virus encontró una reserva natural en los monos. No existe esperanza alguna de eliminarlos destruyendo sus huéspedes naturales. Los científicos podrían controlar la enfermedad mediante la sustitución de formas nativas del mosquito por otras naturales genéticamente alteradas para que no propaguen la enfermedad; una medida todavía muy lejana. Cabe incluso que antes estalle una epidemia de fiebre amarilla en los Estados Unidos, sobre todo en el sur profundo, donde abunda *A. aegypti*.

Pese al desarrollo de la medicina y la vacuna podría desencadenarse una epidemia con suma rapidez. Una vez desatada, los servicios sanitarios necesitan tiempo para inmunizar a la población de riesgo y establecer un control del mosquito eficaz y medidas de cuarentena. El Instituto de Medicina de los Estados Unidos ha calculado que un brote de fiebre amarilla en una gran ciudad como Nueva Orleans ocasionaría unos cien mil casos y cerca de diez mil fallecidos.

En el escenario previsto por el Instituto, virus hasta ahora desconocidos podrían ocasionar crueles desastres sanitarios (el VIH, causante del sida, es un ejemplo de cómo un oscuro virus ha podido ocasionar una pandemia). Urge, pues, que se adopten mejores métodos de identificación de nuevos brotes de enfermedades infecciosas para detenerlas con prontitud. Tras su experiencia con la epidemia de fiebre amarilla de 1793 en Filadelfia, Benjamin Rush y sus colegas médicos estarían totalmente de acuerdo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FORGING FREEDOM: THE FORMATION OF PHILADELPHIA'S BLACK COMMUNITY 1720-1840. Gary B. Nash. Harvard University Press, 1988.

BRING OUT YOUR DEAD: THE GREAT PLAGUE OF YELLOW FEVER IN PHILADELPHIA IN 1793. J. H. Powell. Edición reimpresa. University of Pennsylvania Press, 1993.

A MELANCHOLY SCENE OF DEVASTATION: THE PUBLIC RESPONSE TO THE 1793 PHILADELPHIA YELLOW FEVER EPIDEMIC. Dirigido por J. Worth Estes y Billy G. Smith. Science History Publications/USA, Philadelphia, 1997.

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Ecólogo de cursos de agua

Vale, lo confieso: mi especialidad científica es la física nuclear, pero cualquier día podría perderme siguiendo el curso de un arroyo o de un riachuelo, lejos del túnel por donde serpentea el acelerador lineal. Además, la ecología, en especial la de los cursos de agua, brinda óptimas oportunidades para realizar investigaciones de provecho sin ser ningún experto en limnología. Son tan sencillas las técnicas empleadas y tan inmediatos los resultados, que cualquiera puede montar sin dificultad unas maravillosas experiencias científicas para toda la familia con un poco de preparación. No sólo eso. Pueden establecerse fecundas relaciones con otros aficionados. Con la difusión del movimiento ecologista, se han multiplicado por miles los naturalistas de fin de semana. Muchos grupos, en bastantes países, trabajan ya en la evaluación de la salud de las cuencas fluviales de sus respectivos países. ¿Por qué no ser nosotros uno de ellos?

Hay grupos de todos los tamaños y posibilidades. Desde los que cuentan sólo con unos cuantos miembros y funcionan con cuatro chavos hasta asociaciones excursionistas con un presupuesto millonario. Algunas organizaciones limitan su actividad a controles físicos y biológicos: registran la temperatura del agua, el caudal de ésta y su transparencia, o bien levantan censos regulares de las poblaciones que allí medran. Otros grupos disponen del equipo necesario para medir el oxígeno disuelto y los niveles de *p*H, comprueban la presencia de bacterias coliformes fecales y la de distintos contaminantes. Todos esos voluntarios contribuyen de modo importante a la mejora del medio ambiente, por más que sea desde el curso de agua "asignado".

Esas organizaciones hacen llegar sus datos a las autoridades interesadas en la protección y vigilancia de la calidad del agua. En Estados Unidos, la Agencia de Protección del Ambiente (EPA) fomenta ese torrente desbordante de talento con una serie de publicaciones gratuitas. La EPA edita *The Volunteer Monitor*, excepcional boletín semestral cuya lectura ha sido pasto del que se ha nutrido el mundo ecologista independiente.

El examen de muestras de microfauna proporciona una comprobación sencilla acerca del estado de contaminación

Como con cualquier ecosistema, los cursos de agua ofrecen numerosas oportunidades a la investigación. Me atrae muchísimo trabajar con los animalillos que trepan por rocas y ramas o se entierran en los sedimentos. El estudio de la diversidad de esos "macroinvertebrados" fácilmente visibles proporciona un modo excelente de juzgar la salud de la corriente, ya que la contaminación afecta a unos tipos más que a otros. Por ejemplo, la presencia de ninfas de mosca pedrera (criaturas bastante sensibles) en los arroyos de los estados mesoatlánticos indicaría que la contaminación no llega a niveles preocupantes. Pero las reglas



varían de un lugar a otro. Por eso hay que informarse de la gente que trabaje en nuestra zona acerca de qué organismos son más sensibles a la contaminación.

Para examinar esos invertebrados, nos servirán algunos de los métodos empleados en las masas de agua estancada [véase "El ecólogo en la charca", Taller y Laboratorio, noviembre 1996]. Sin embargo, el ímpetu de las aguas someras de arroyos y riachuelos hace que la técnica aquí descrita se adapte perfectamente a la recogida de especímenes biológicos.

De entrada necesitamos una red. Sujétese un metro cuadrado de red tupida a un par de soportes bien firmes. [Unas clavijas de madera resistentes nos darán buen resultado.] Si los ecologistas de los contornos emplean para estos estudios una malla de medida normalizada (por lo común de 500 micras), les imitaremos. Otra posibilidad es emplear pantalla de ventana de plástico.

Ya estamos en nuestro arroyo, nosotros y un acompañante. Elegiremos tres emplazamientos representativos dentro de un tramo no superior a cien metros. Nos proponemos colocar una sonda de un metro cuadrado en cada lugar. Para ello, nos calzaremos los dos botas de cadera de caucho para entrar en el agua. Subiremos desde el curso bajo, para que nada de lo que alteremos en nuestro movimiento menoscabe el rigor del trabajo.

Al llegar al primer emplazamiento, se abre la red. Clavaremos las puntas de las clavijas en el fondo, de suerte que la red quede inclinada 45 grados corriente abajo. La base de la red debe quedar encajada en el lecho del curso de agua. Nuestro ayudante se habrá apartado un metro de la red para recoger todas las piedras grandes de la zona a examinar, frotarlas suavemente bajo el agua y desalojar así los organismos que vivan en ellas. Entonces el movimiento del agua llevará hacia la red todo lo que haya hecho saltar el frotamiento. (Alternativamente, frotar las piedras encima de un cubo puede ser un procedimiento más directo para recoger organismos.)

Acabada la tarea con los guijos, nuestro compañero dará puntapiés, aquí y allá, que agiten el fondo de la cuadrícula elegida. Un par de minutos de esa actividad bastará para que los organismos que vivan en las piedrecitas sean arrastrados hacia la red. Por último, entre nuestro ayudante y nosotros tiraremos de la red y la sacaremos del agua.

Una vez en la orilla, buscaremos con la lupa y recogeremos los organismos que estén pegados a las ramitas y otros asideros llevados por la corriente. Sacaremos con pinzas las criaturas de mayor tamaño; verteremos el resto de la red en un cubo que tenga agua limpia de la misma corriente. Esperaremos que se asiente el contenido del balde; retiraremos entonces el agua en exceso con una taza y la filtraremos con una media de nailon. No hay que dejar escapar nada. Tendremos que repetir el mismo protocolo en los otros dos emplazamientos, reuniendo los especímenes en el cubo.

El agua que ha quedado se vierte en el cubo a través de los filtros de media. Le daremos luego la vuelta a la media para que, ayudados de un poco de alcohol, desprenda el contenido dentro de un tarro de conservas de vidrio. Con una cucharilla de café y unas pinzas sacaremos el resto de la pesca viva del balde; se introduce en el tarro y lo llenamos de alcohol antes de enroscar la tapa. Ha llegado el momento de etiquetar el tarro con un adhesivo grande donde anotaremos a lápiz el lugar, la fecha y el nombre del acompañante. (El alcohol corre la tinta si empleamos la pluma.)

Podemos ya ocuparnos del análisis pormenorizado de la cosecha. Apuntaremos tipos y cantidades de los organismos presentes. Los profesores de los institutos o universidades cercanas pueden echarnos una mano para la identificación apropiada de cada invertebrado. Ellos nos enseñarán también el manejo correcto de las guías para que nosotros podamos adquirir esa habilidad. Duchos ya en la tarea taxonómica, podremos volver periódicamente a esos emplazamientos para dar fe de los cambios estacionales y anuales.

Aunque es probable que nos guste adquirir cierta práctica con los cursos de agua cercanos a casa, conviene disponer de una visión general. En un mapa a escala 1:24.000 del Servicio Geológico podremos comprobar el encaje de nuestro riachuelo de trabajo en la cuenca hidrográfica de la región. Contrastando los hallazgos realizados con los de otros grupos y representando sobre el mapa los emplazamientos de las investigaciones, descubriremos enseguida qué lugares merecen estudiarse. Doble la red, tome las botas, agarre el cubo, contagie a algún amigo. Y al río.

Para más información acerca de este u otros proyectos para aficionados, visite la sección Forum de la Society for Amateur Scientists en http://web2.thesphere.com/SAS/Web.cgi en la World Wide Web. Puede también escribir a la Society for Amateur Scientists, 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, o llamar al (619) 239.88.07.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

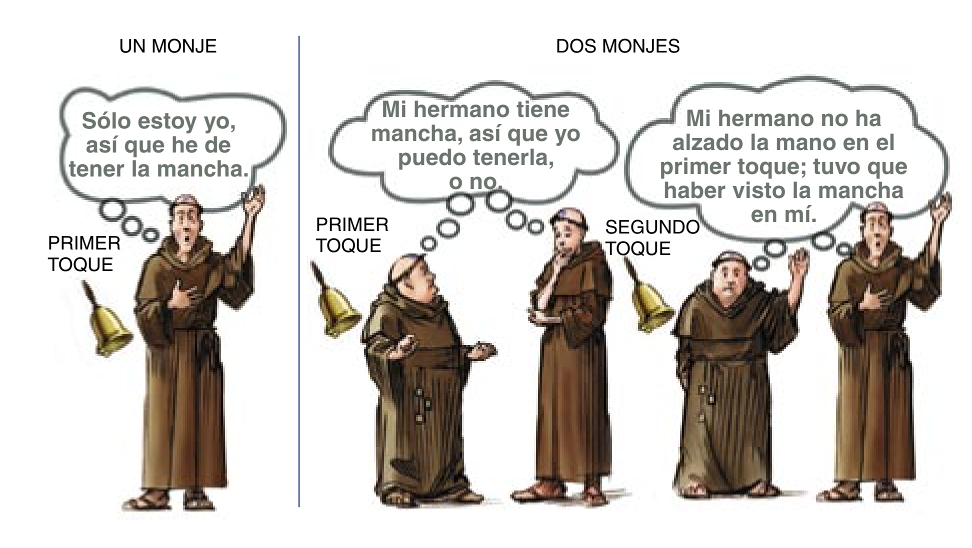
Monjes maculados y conocimiento común

Los monjes de la Orden de la Perplejidad, cuyos modales son exquisitos, sólo se gastan bromas lógicas. Una noche, hallándose dormidos los hermanos Antonio y Benito, el hermano Jonás se cuela en su celda y les pinta una mancha azul en sus rapados cráneos. Por la mañana, al levantarse, cada uno observa la mancha del otro, pero, por delicadeza, nada dicen. Ambos se preguntan si también estarán maculados, mas callan por discreción. Sin embargo, el hermano Zenón, apenas aprendiz en el arte del tacto, no ha podido reprimir una risita. Ante la curiosidad de los otros, dice tan sólo: "Al menos uno de vosotros lleva pintada en la cabeza una mancha azul."

Evidentemente, los dos monjes ya sabían eso. Pero entonces Antonio empieza a pensar: "Yo sé que Benito tiene una mancha, pero él no puede estar seguro. ¿Tendré yo una mancha? Bueno, supongamos que yo no la tuviera. Entonces Benito, al observar que yo no tengo mancha, deducirá enseguida, por el comentario de Zenón, que es él quien la tiene. Pero Benito no se ha alterado lo más mínimo, lo que significa... ¡que soy yo el manchado!" Al darse cuenta, el hermano Antonio se sonroja como un tomate. También en ese instante, y por razones semejantes, se sonroja el hermano Benito. Sin el comentario de Zenón, no hubiera comenzado ninguno de los dos razonamientos, a pesar de que, en apariencia, Zenón nada les dice que no supieran ya.

Sin embargo, si nos paramos a analizar lo que pasa, resulta claro que la declaración de Zenón —"Al menos uno de vosotros lleva pintada una mancha azul"— sí aporta nueva información. ¿Qué saben los monjes? Antonio sabe que Benito tiene una mancha, y Benito sabe que la tiene Antonio. Así que la declaración de Zenón no se limita a informar a Antonio de que alguien tiene una mancha: también le está diciendo a Antonio que ahora Benito sabe que alguien tiene una mancha.

Son muchos los divertimentos lógicos de este tipo, entre ellos, versiones con niños que llevan la cara sucia e invitados a fiestas de disfraces. Pertenecen a los llamados problemas de conocimiento común, porque se basan todos en un aserto sabido por todos los miembros de un grupo. No importa tanto el contenido del aserto cuanto que cada uno sabe que todos los demás lo saben. Una vez ha llegado a ser de conocimiento común, resulta posible razonar cómo van a responder otras personas ante él.



El efecto resulta todavía más desconcertante cuando lo ensayamos con tres monjes. Ahora, los hermanos Antonio, Benito y Cirilo están dormidos en su celda, y Jonás le pinta a cada uno una mancha azul en la cabeza. Lo mismo que antes, al despertar, cada uno de ellos observa las manchas de los demás, sin decir nada. Es entonces cuando Zenón larga el bombazo: "Al menos uno de vosotros tiene una mancha azul en la calva."

Esa información hace que Antonio cavile: "Supongamos que yo no tuviera la mancha. Entonces Benito vería la pintura en Cirilo, pero no en mí, y podría preguntarse si él mismo está pintado. Y podría razonar de este modo: 'Si yo, Benito, no estuviera pintado, Cirilo vería que ni Antonio ni Benito tienen la mancha, y deduciría inmediatamente que él sí la tiene. Pero Cirilo ha tenido tiempo sobrado para pensar esto, y no parece afectado, entonces, soy yo, Benito, el que ha de tener una mancha.' Ahora bien, como Benito también ha tenido tiempo de sobra para pensar todo esto y no parece sentirse incómodo, resulta que yo, Antonio, he de tener una mancha." En ese momento, Antonio se pone como un tomate, lo mismo que Benito y Cirilo, cuya mente ha viajado por parecidos derroteros.

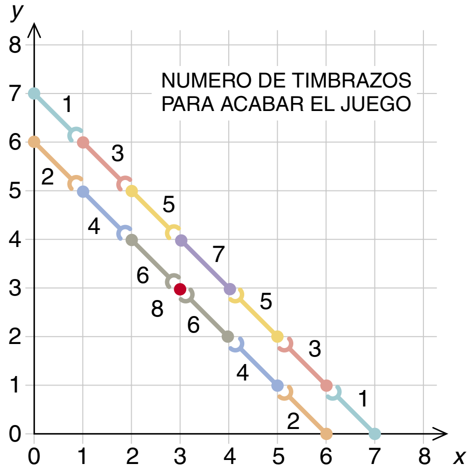
La misma lógica funciona con cuatro, cinco o más monjes, aunque sus deducciones van haciéndose cada vez más rebuscadas. Supongamos que hubiera 100 monjes, todos pintados con una mancha azul, sin que ninguno de ellos lo sepa, y todos ellos capaces de velocísimos razonamientos lógicos. Supongamos también que el abad del monasterio usa una campanilla para sincronizar los razonamientos de los monjes. "Voy a tocar la campanilla cada 10 segundos", dice el reverendo padre. "Inmediatamente después de cada toque, quienes de vosotros hayan podido deducir que están pintados de azul deben alzar la mano. Al menos uno de vosotros, hijos míos, tiene una

mancha azul.” Nada ocurre durante 99 campanillazos; pero, llegado el centésimo, los 100 monjes levantan la mano a la vez.

El razonamiento lógico es como sigue: si en el grupo hubiera sólo un monje, deduciría de inmediato que es su cabeza la pintada, por lo que alzaría la mano al primer toque de campanilla. Si los monjes son dos, cada uno empieza suponiendo que no es él quien lleva la mancha, y ninguno levanta la mano en el primer aviso. Pero entonces cada monje deduce de la reacción del otro que su hipótesis es falsa. “Si no tuviera una mancha en la cabeza”, razona cada uno, “mi hermano habría alzado el brazo. Como no lo ha hecho, he de tener una mancha.” Así que ambos alzan la mano al segundo campanillazo. La regla es la misma para cualquier número de monjes; se trata de un ejemplo de inducción matemática, que dice que, si una propiedad de los números es verdadera para $n = 1$, y si su validez para n implica que se verifica para $n + 1$, entonces es válida para todo n. Si hay 100 monjes en el grupo, cada uno supone que no está marcado y espera que todos los demás monjes levanten la mano tras el campanillazo nonagésimo nono. Al no ocurrir eso, cada uno de los monjes comprende que su presunción era errónea, y al campanillazo siguiente todos levantan la mano.

Otro intrigante rompecabezas de conocimiento común fue inventado por John H. Conway, de la Universidad de Princeton, y Michael S. Paterson, de la Universidad de Warwick, en Inglaterra. Imaginemos que el Sombrero Loco de Alicia invita a un té para matemáticos. A cada uno de los asistentes se le da un sombrero que lleva escrito un número. El número tiene que ser mayor o igual que 0, aunque no tiene por qué ser entero; además, al menos uno de los números de los jugadores debe ser distinto de 0. Al colocar los sombreros ningún jugador puede ver su número, pero sí puede ver los de todos los demás.

Hablemos ahora del conocimiento común. Clavada en la pared hay una lista de números, uno de los cuales es el resultado correcto de la suma de todos los números de todos los gorros de los jugadores. Supongamos que el número de posibilidades ofrecida por la lista sea menor o igual que el número de jugadores. Cada 10 segundos suena un timbre, y quien



Los segmentos indican cuánto dura el juego con dos jugadores

sepa deducir el número que tiene —o lo que es igual, la suma correcta, pues cada uno puede ver los números de todos los demás— ha de anunciar ese hecho. Conway y Patterson demostraron, con lógica perfecta, que algún jugador acabará haciendo el anuncio.

Imaginemos que sólo hay dos jugadores, cuyos sombreros llevan los números x e y, y supongamos que los números anunciados en la pared sean 6 y 7. Los dos jugadores saben que $x + y = 6$ o que $x + y = 7$. Ahora, un poco de geometría. Los pares (x, y) que satisfacen alguna de estas condiciones corresponden a puntos situados en dos segmentos rectilíneos paralelos en el primer cuadrante del plano. Si x es mayor que 6, el jugador y terminará la partida en el primer timbrazo, porque puede ver inmediatamente que un total de 6 es imposible. Análogamente, el jugador x daría fin al juego si y fuera mayor que 6. Si ninguno de los jugadores responde después del primer timbrazo, estas posibilidades quedan eliminadas. El juego termina entonces al segundo toque del timbre si uno u otro de los valores x e y es menor que 1. ¿Por qué? Uno de los jugadores verá el sombrero que lleva un número menor que 1, y sabrá que su propio número tiene que ser 6 o menos; por consiguiente, el total 7 queda descartado.

Los pares (x, y) que van siendo eliminados en cada toque del timbre forman sucesivos segmentos oblicuos de los dos segmentos originales, y agotan rápidamente todas las posibilidades. El juego ha de terminar en el octavo timbrazo si x e y son ambos iguales a 3. Todas las demás posibilidades se resuelven en un máximo de 7 timbrazos. En los juegos con dos o tres jugadores se puede aplicar un razonamiento parecido, pero la demostración reviste mayor complejidad matemática.

Acuse de recibo

En el Acuse de recibo del artículo de septiembre de 1997 se trató un problema sugerido por Robert T. Wainwright, de New Rochelle, que preguntaba cuál era el área máxima que podía ser recubierta por triángulos equiláteros cuyos lados fueran números enteros primos entre sí. Como ya señalaron varios lectores, no existe límite superior si el número de triángulos puede ser tan grande como sea necesario, pero el objetivo del problema es maximizar el área para un número dado de triángulos. Wainwright alcanzó un área de 496 con 11 triángulos, donde, por conveniencia de recuento, se ha tomado como unidad de área la de un triángulo equilátero de lado 1. Robert Reid, de Londres, ha encontrado teselaciones que van de 12 a 17 triángulos. Sus áreas son: 860 (12 triángulos); 1559 (13); 2831 (14); 4751 (15); 8559 (16); y 14.279 (17). —*I.S.*

Teselación máxima correspondiente a 17 triángulos

Nexos

James Burke

Tic-tac

El otro día, cuando paseaba por Parliament Square, en Londres, me vino a la memoria una escena de mi infancia. Eran los años de la guerra. Las campanadas del Big Ben dando la hora por la radio nos infundían tranquilidad, pues era una reconfortante señal de que seguía allí, indemne ante los temibles V-1 alemanes.

En 1859, la instalación del sistema de escape por gravedad creado por E. Beckett Denison transformó al nuevo Big Ben en un milagro de precisión de la técnica más depurada. Se cumplía así una promesa del primer ministro George Canning. El sistema ideado por Denison aislaba de tal modo el movimiento del péndulo del movimiento del engranaje y era tan eficaz, que la precisión del Big Ben no se resentía ni por la suciedad ni por el hielo que se acumularan en sus cuatro juegos de manecillas. (Gracias le sean dadas a Frederickton, New Brunswick, el reloj de cuya catedral, con frecuencia helado, sirvió a Denison de banco de pruebas.)

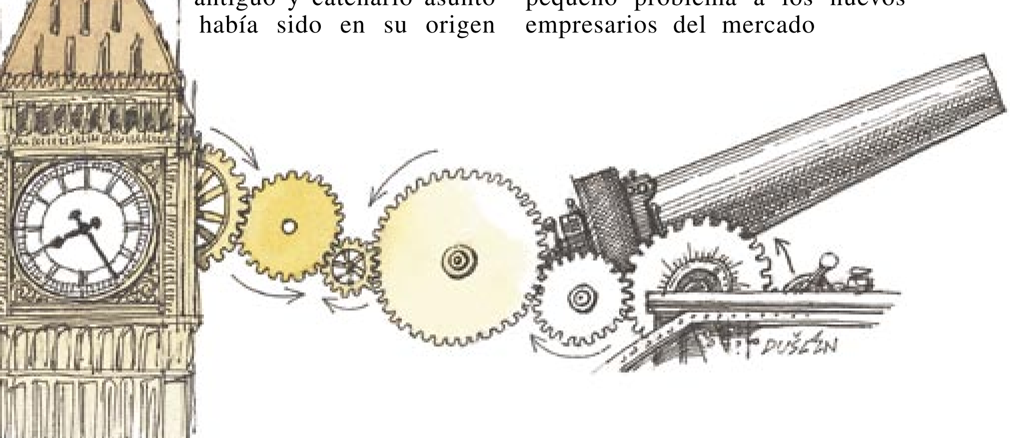
El escape básico aperiódico que Denison perfeccionó, conecta el movimiento del péndulo con un par de hojas. En su ida y venida de un lado a otro y vuelta, cada una se instala sobre los dientes del engranaje de rueda que mueve al reloj; y controla su giro en un vástago atado con una cuerda ligada a un peso. Probablemente, la versión más famosa del escape aperiódico fuera la feliz idea de George Graham, maestro de relojeros del siglo XVIII. En el verano de 1736, cierto francés de insolente arrogancia se llevó a Suecia uno de sus relojes de precisión astronómica. Me refiero a Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, empeñado en comprobar si los ingleses tenían razón en lo pertinente a la figura terrestre.

Esta preocupación geodésica no suponía otro ejemplo del prurito que sufrían los franceses desde Newton. Se trataba de una minucia que podía ser el fundamento de múltiples naufragios. Si la forma de la Tierra no era la que se creía, entonces tampoco podían ser correctas las mediciones de un grado de su superficie. Lo que implica que los barcos embistan escollos que, de acuerdo con las cartas, no deberían estar allí. Errores fatales como éstos arrastraban a flotas enteras al fondo del mar, hundiendo con demasiada frecuencia grandes cantidades de oro y de armas. Maupertuis ofreció una solución: consideró una diferencia de un grado en la posición de una estrella (de ahí la necesidad de un cronometraje exacto) y calculó cuánto representaba un grado de latitud en la superficie planetaria. Empleó en ello varios meses perdido en medio de Suecia en un infierno de mosquitos. Al final de ellos, *sacre bleu!*, Newton tenía razón. La Tierra era una esfera achatada. Según era de esperar, Maupertuis se hizo enemigos de vuelta a casa. Anglófilo, arrogante y, para postre, acertado.

Maupertuis se convirtió en el blanco de feroces ataques por parte de Voltaire y tuvo que marcharse de Francia. Murió años más tarde en casa de Johann Bernoulli, matemático suizo cuyo hermano Jacob, matemático también, andaba muy intrigado por averiguar el motivo de que las cadenas que cuelgan adoptaban la forma que ofrecían. Este antiguo y catenario asunto había sido en su origen la obsesión del fabricante de pasta holandés Simon Stevins, que en 1585 ya había concebido la novedosa idea de emitir la moneda en fracciones decimales. Nadie retomó el asunto hasta que un aristócrata cojo, el gobernador Morris, se lo propuso a Thomas Jefferson, quien lo hizo suyo. En cualquier caso, Morris promovió con éxito otra idea (a su vez también estimulado por otro político, DeWitt Clinton): la construcción de un canal desde el lago Erie hasta el Hudson. Un proyecto popularizado en canciones y narraciones hasta que alguien construyó en 1851 una vía férrea que atravesaba el estado de Nueva York y que enterró el canal en el olvido.

En 1855 la vía férrea de New York & Erie tenía 4000 empleados y problemas logísticos tan complejos, que su superintendente general, Daniel McCallum, se vio obligado a inventar la moderna administración de empresa para gestionarlo: jefes de división autónomos, mandos intermedios, informes diarios, semanales y mensuales, etc. Precisamente el transporte regular y en masa de mercancías fue lo que permitió la aparición de los grandes almacenes con elevados volúmenes de ventas; por ello no es de extrañar que Wanamaker's o Macy's fueran de las primeras empresas en adoptar la estructura piramidal del ferrocarril.

El transporte eficiente de una inopinada y variada serie de artículos, de candelabros a diademas o guantes, y las técnicas de venta inspiradas en la producción en serie plantearon un pequeño problema a los nuevos empresarios del mercado



de masas: cómo persuadir al cliente para que cargara con las mercancías tan pronto como éstas llegaban por la puerta trasera. A tal efecto los almacenes, instalados ya en el centro de la ciudad, transformaron sus dependencias en algo a caballo entre un vestidor victoriano y el palacio de Ramsés II, con añadidos como músicos, salones de belleza, oficinas de correos y guarderías. Por primera vez, ir de compras se convirtió en actividad de ociosos con dinero. La dirección había conseguido convencer a sus clientes femeninos para que acudieran y compraran hasta la extenuación.

Wanamaker's contrató para su crucial servicio de relaciones públicas a N. W. Ayer, la primera agencia de publicidad experimentada. A finales del siglo XIX se reclutaba una nueva hornada de pensadores llamados psicólogos para que hurgaran más en las motivaciones emocionales del consumidor a fin de descubrir si quedaba algún margen aprovechable para la manipulación. Walter B. Cannon, profesor de psicología de Harvard (y el único psicólogo, que yo sepa, al que se le ha dedicado una montaña), fue más allá. Con el uso de los sorprendentes y nuevos rayos X y una papilla de bario de su invención, Cannon estudió las ondas peristálticas que acompañan a la digestión y al hambre y comprobó que se detenían si el sujeto sufría emociones fuertes. Tras años de experimentación, en 1932, la obra maestra de Cannon, *The Wisdom of the Body*, introdujo el concepto de homeostasis: el mantenimiento del equilibrio del cuerpo mediante mecanismos de retroalimentación químicos.

Colaboraba con Cannon un neurofisiólogo mexicano, Arturo Rosenbleuth. A principio de los años cuarenta, empezó éste a mantener conversaciones sobre retroalimentación con un virtuoso de la matemática, el irascible Norbert Wiener, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Estaba interesado en fenómenos de retroalimentación como los que permiten que boca y cristal se encuentren. Wiener estaba preocupado en asuntos de aciertos y fallos porque trabajaba en el tipo de ecuaciones que habían de facilitar a la artillería antiaérea que alcanzase sus objetivos con una frecuencia superior a uno de cada dos mil quinientos disparos. En esa razón estaba el promedio en la costa sur de Inglaterra, ¡y así no había manera de ganar la guerra!

El sistema de Wiener, llamado Predictor M-9, utilizaba la retroalimentación de datos del radar para predecir en qué parte del cielo se encontraría el enemigo cuando llegara la siguiente pieza de artillería. De esta forma, su invento controlaba cómo debía orientarse el objetivo. El invento resultó tan bueno que, en la última semana de ataques a gran escala, en Londres sólo cuatro de los ciento cuatro V1 lanzados se salvaron de la artillería. Gracias a Wiener el Big Ben escapó indemne a la Segunda Guerra Mundial.

!Cuánto lo echaré de menos!

LIBROS

Renacimiento

Rememorado

FELIPE II Y SU TIEMPO, por Manuel Fernández Alvarez. Espasa; Madrid, 1998. **HUMANISMO Y PERVIVENCIA DEL MUNDO CLÁSICO**. Dirigido por José María Maestre Maestre, Joaquín Pascual Barea y Luis Charlo Brea. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz; Cádiz, 1997. **LES VOIES DE LA SCIENCE GRECQUE. ÉTUDES SUR LA TRANSMISSION DES TEXTES DE L'ANTIQUITÉ AU DIX-NEUVIÈME SIÈCLE**. Dirigido por Danielle Jacquart. Droz; Ginebra, 1997.

MELANCHTHON IN SEINEN SCHÜLERN. Edición preparada por Heinz Scheible. Harrassowitz Verlag; Wiesbaden, 1997. **THE CLOCK AND THE MIRROR. GIROLAMO CARDANO AND RENAISSANCE MEDICINE**, por Nancy G. Siraisi. Princeton University Press; Princeton, 1997.

PARACELSUS. FOUR TREATISES. Dirigido por Henry E. Sigerist. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1996. **PARACELSUS: SPECULATIVE THEORY AND THE CRISIS OF THE EARLY REFORMATION**, por Andrew Weeks. State University of New York Press; Albany, 1997. **DE NOMINE ET VOCABULO: DER BEGRIFF DER MEDIZINISCHEN FACHSPRACHE UND DIE KRANKHEITSNAMEN BEI PARACELSUS (1493-1541)**, por Michael Kuhn. Universitätsverlag C. Winter; Heidelberg, 1996.

Será por ignorancia, será por apocamiento moral, la historiografía cantonalista que prima hoy en España se muestra remisa a enmarcar el Renacimiento en el contexto imperial, hundir su raíz en los Reyes Católicos y coronar su vigor en la derrota turca con Felipe II. Cien años de gloria en la vida de nuestra nación y siglo forjador de una nueva Europa. De fuera vinieron Peter Pierson, Geoffrey Parker y Henry Kamen para contárnoslo sin encogimiento. Ninguno lo ha conseguido con la llaneza y maestría de Manuel Fernández Alvarez en *Felipe II y su tiempo*. Todos, empero, pasan de puntillas sobre la ciencia y la técnica hispanas, capítulo que se mantea con una mediocre faena de aliño.

A caballo entre el siglo XV y el XVI, el triunfo español en Nápoles sobre los franceses anunciaba un nuevo orden, que habrían de asegurar los tercios viejos. El horizonte se amplía en 1522 cuando Juan Sebastián Elcano culmina la vuelta a la Tierra iniciada tres años antes por Magallanes. Que es un avance sin retorno lo comprueba Francisco I cuando, en 1525, es aprehendido. Aprieta la amenaza del turco, que penetra Danubio arriba. Pero la cristiandad se enzarza en guerra civil, de la que es exponente el "sacco de Roma". La esperanza está en el emperador Carlos, coronado en Bolonia en 1532. Más que un honor, lo toma como un compromiso de defensa y unidad de Europa ante el enemigo común. En ese tablero debe leerse su entrada triunfal en Viena, roto el cerco, la campaña de Túnez, la gesta de Herzog Novi, la temeridad en Argel.

El heredero, nacido en 1527, no renuncia a la sucesión del Imperio. Pero se desenvuelve mejor encastillado en España. Termina con el nomadismo paterno y fija la capital en Madrid. Afirma la unidad peninsular, con la incorporación de Portugal. Fomenta el progreso pacífico de América. Y funda el monasterio de San Lorenzo, auténtico foco renacentista cuya frustración se ha ponderado más que estudiado su alcance.

Si la economía había sido el talón de Aquiles del padre, Felipe no la endereza cuando le tocó el turno. Los males, denunciados por Luis de Ortíz en su "Memorial" de 1558, tienen su origen en la carga que supone mantener la supremacía sobre Europa. Al no bastar los caudales propios ni las remesas de Indias, el Emperador tuvo que acudir a los créditos de los banqueros.

Se remata el cuadro introductorio con alusiones a la enseñanza de Copérnico y la creación, mediados los cincuenta, de una cátedra de anatomía en Salamanca, dos hechos de tópica mención. Pero ambos son sólo un reflejo pálido de la ciencia del XVI. Debe ésta plasmarse asociada a la recuperación del legado clásico. En parte sobre ello versa *Humanismo y Pervivencia del Mundo Clásico*, homenaje a Luis Gil, autor de un sugerente *Panorama social del humanismo español* y promotor del estudio de las raíces grecolatinas de nuestra cultura en el Quinientos.

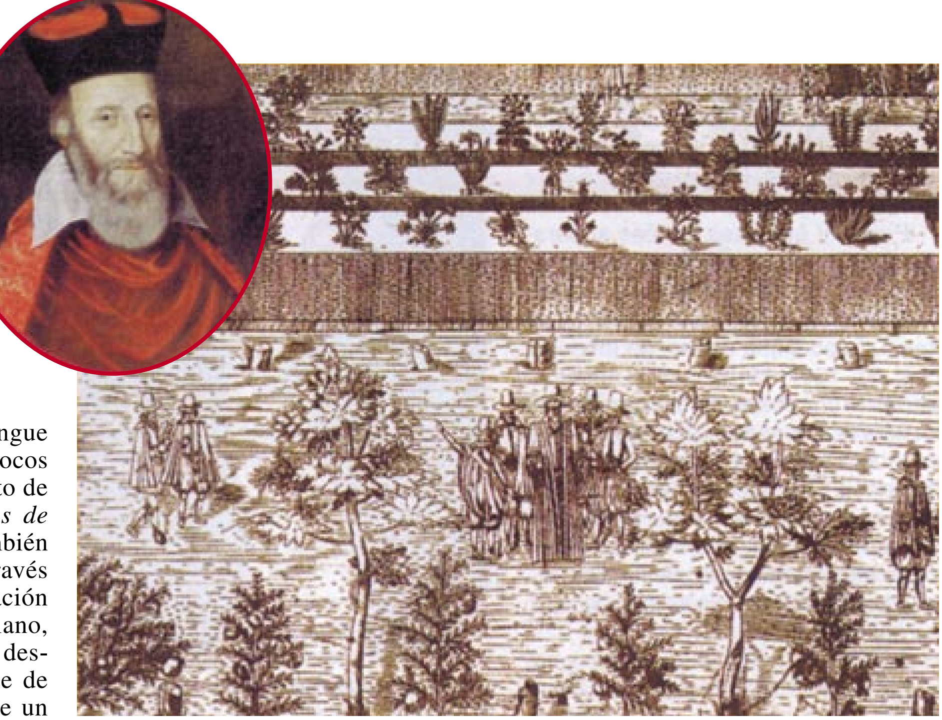
Se quejan muchos, tras Gil, que gozando entonces España de una situación inmejorable, no produjera un humanismo más vigoroso. Y se recuerdan las relaciones anudadas con las comunidades griegas integradas en el Imperio Otomano, la soberanía sobre Nápoles y Sicilia y la conquista de plazas norteafricanas. Una opinión crítica que se alimenta de las quejas y puyas de algunos contemporáneos, Nebrija el más ácido. Pero esa idea arraigada en las aulas de letras acabará arrumbada en cuanto se atrevan a mirar la teoría, fornida y larga, de matemáticos, cosmógrafos e ingenieros que duermen empapelados en Simancas.

También importa que fuera se enteren. Ninguna injusticia mayor que la que sufre el propio Elio Antonio de Nebrija, ignorado en las monografías de historia de la materia médica redactadas por ultrapirenaicos. Siendo verdad, por contra, que a los dos años de su aparición en París, Nebrija publica en Alcalá *De medicinali materia... Ioanne Ruellio Suessionensi interprete*, cuyo latín le parece más ajustado que la traducción coetánea de Hermolao Barbaro. Añade por su cuenta una breve biografía del anazarbeo y un léxico de más de 1800 voces, donde demuestra amplios conocimientos de botánica.

La identificación y definición de los vocablos constituye la labor primera de la ciencia renacentista. A veces la interpretación ofrecida resulta emblemática. Sea por caso la voz evacuación, nuclear en la fisiología y terapia galénicas, o los términos anatómicos brazo y antebrazo, de significado variable. Para señalar la evacuación, el médico solía emplear, aunque no exclusivamente, los verbos (*e*)*vacuare* y *purgare*, con sus respectivos compuestos y derivados, en tanto que *derivare* y *revellere* definen los modos de la evacuación. A la extremidad superior los renacentistas llamaban *brachium* ("brazo"). Pero

no de una manera firme. Unas veces designaba la extremidad superior entera, otras el brazo y otras el antebrazo. Vesalio intenta ser tajante y restringe la equivalencia al brazo propiamente dicho. Pero Vallés parece dar un paso atrás en su titubeo e iguala *brachium* primero a toda la extremidad superior y luego a una de sus partes, el brazo.

Si el análisis filológico distingue el quehacer humanista, muy pocos igualaron a Janus Cornarius, objeto de un extenso apartado en *Les voies de la science grecque,* que ofrece también la cara obscura de la época a través de un trabajo sobre la clasificación de las ciencias en Angelo Poliziano, espejo de humanistas. Pone al descubierto el escolasticismo de base de quienes, en voz alta, abominan de un pasado bárbaro.



Clase práctica en el jardín botánico de Montpellier impartida por Richer de Belleval, según un grabado del siglo XVI

Entre las cuestiones propedéuticas no era ninguna novedad del humanismo la relativa a la clasificación de las ciencias. Pero a ella se aplicó con denuedo ya a finales del siglo XV Poliziano en su *Panepistemon*, opúsculo de gran influencia. Si Petrarca sacrificaba la filosofía y la ciencia en altar de la retórica, otros eran menos radicales. Coluccio Salutati concedía idéntica dignidad a las artes del *quadrivium* (aritmética, geometría, música y astronomía) que a las del *trivium* (gramática, retórica y dialéctica). Pero todavía a principios del siglo XV no movía a respeto el experto en física o en matemática.

Poliziano inscribe su *Panepistemon* en la tradición de Temistio, Simplicio, Amonio, es decir, de los comentaristas de Aristóteles. Reivindica, a partir de un núcleo peripatético, todas las artes sin excepción: “no sólo las disciplinas y las artes que llaman liberales y mecánicas, sino también los oficios viles, que son indispensables para la vida”. En ello afirma comportarse como un gramático, no como un filósofo. Para él la filosofía consta de tres partes: contemplativa (teorética), activa (práctica) y discursiva (lógica). La contemplativa abarca la metafísica, la física, la matemática y la ciencia del alma. A las matemáticas consagra la mitad del *Panepistemon*, inspirándose en Boecio, Geminus de Rodas, Arístides Quintiliano y Ptolomeo. Pero la mayoría de las fuentes del *Panepistemon* permanecen escondidas. Pese a lo que da a entender, Poliziano no bebe sólo en manantiales clásicos, sino también en Hugo de san Víctor y en santo Tomás.

El papel eminente que desempeñan las prensas de Basilea, en el segundo tercio del siglo XVI, a propósito de la ciencia griega, lleva el sello de Johann Haynpol (“Ioannes Cornarius”). Cornarius, tras formarse en griego y latín, estudió medicina en la Universidad de Wittenberg. Allí, recuerda, no había otra enseñanza que la de Avicena y Rhazes, con referencias ocasionales a Hipócrates y Galeno; de los demás, añade con rechifla humanista, “ni siquiera se sabía que habían nacido”. Viaja por toda Europa y recala en la imprenta basilense de Froben, donde pule y traduce de forma incesante. Su obra compiladora del canon hipocrático, modélica, sirve todavía de referencia.

Philipp Melanchthon (1497-1560) hizo mucho para que el severo humanismo protestante no se alejara del católico en la recuperación del saber antiguo. Según la moda humanista, trasladó su apellido Schwartzerd, “tierra negra”, al griego Melanchthon. Aprendió lenguas clásicas en Heidelberg y, en Tübingen, conoció la filosofía escolástica, sin dejar de interesarse por el occamismo. Creía en fuerzas ocultas, en la influencia de las estrellas y en los sueños, actores de un mundo en que el mal no era un factor secundario. Formó escuela, con epígonos de la talla de Paul Eber o Georg Major, destacados en *Melanchthon in seinen Schülern*.

La trayectoria intelectual de Eber va asociada a la física de la Reforma con su rechazo inicial de la concepción copernicana; la de Major, a la dialéctica. Uno y otro, bajo la supervisión directa de Melanchthon. De la pluma de Major salió un alud de manuales. Llevan el sello humanista de amor por el lenguaje, la retórica, la poesía y la composición. Sus *Quaestiones rhetoricae* condensaban las *Erotemata dialectica* y los *Elementorum Rhetorices libri duo* de Melanchthon. De la dialéctica de éste aprendió a entresacar los *loci communes* es decir, los asuntos a destacar en la interpretación de un capítulo o versículo escriturístico, así como a armar una argumentación en unas décadas de aceradas diatribas religiosas.

Con todo, para adentrarse en el pensamiento complejo y atormentado del Renacimiento, habrá que repasar una y otra vez la biografía de Girolamo Cardano (1501-1576) contada por Nancy Siraisi. Le ha puesto por título *The Clock and the Mirror*. Aconseja Cardano que el hombre de estudio tenga siempre a mano un reloj para seguir el paso del tiempo y un espejo para observar la condición cambiante de su cuerpo. Ecléctico en filosofía, injerta en sus ideas médicas la creencia en fuerzas ocultas de la naturaleza y en la capa-



Philipp Melanchthon (1497-1560) procuró que el severo humanismo protestante no se alejara del católico en la recuperación del saber antiguo

cidad guiadora de los sueños. Lo que no empece para que respire la nueva atmósfera del hipocratismo depurado y la anatomía vesaliana.

Cardano se doctoró en Padua, en 1526. Si su éxito profesional en el ejercicio de la medicina le granjeó un prestigio interno, la reputación exterior le vino de la publicación de sus escritos matemáticos, astrológicos y filosóficos. En *Ars magna*, tratado de álgebra, aporta la primera explicación impresa de la resolución de ecuaciones cúbicas. Elabora un compendio enciclopédico de filosofía natural, *De subtilitate*, donde desarrolla su idea motriz. Llama sutileza a una característica especial inherente en las entidades materiales y en las mentales, difícil de aprehender en las primeras por los sentidos y en las segundas por la inteligencia. De esa obscuridad está transida su obra entera. Muestra interés particular en investigar las relaciones entre regularidad y contingencia en el curso de las enfermedades, reflejo de la constancia cíclica de los cielos y los sucesos aleatorios del mundo sublunar. Enreda más tal mixtificación al hilvanarla con la profecía y el pronóstico.

Cardano se confiesa reformista e innovador en medicina. Lo que hay que tomar *cum mica salis*. Igual que muchos de sus contemporáneos creíase un nuevo Galeno, intérprete genuino de Hipócrates, al tiempo que resuelto seguidor de la anatomía de Vesalio. Pero Cardano y Vesalio pertenecen a polos opuestos. La finura de observación, la claridad en la descripción, la habilidad técnica y la seguridad manual mostradas por el autor del *De humani corporis fabrica* son impensables en Cardano. Repásese, si no, el *Contradicentium medicorum liber* de 1545, muy pronto doblado y donde toma por guía el *Conciliator differentiarum philosophorum et medicorum*, de Pietro d'Abano, exponente máximo de la medicina escolástica.

"Si el médico debe conocer la lógica", "Si la medicina es una ciencia" y "Si el cuerpo humano es el objeto de la medicina" son cuestiones propedéuticas para el *Conciliator* y las *Contradictiones*. Pietro d'Abano y Cardano citan las mismas referencias en pro y en contra de los temas. Al reflexionar el primero sobre el empleo de la lógica en medicina distingue entre lógica instrumental y lógica como disciplina especulativa autónoma. Cardano afirma que la medicina tiene su propia *ratio inquirendi*, que, a diferencia de la filosofía, no está ordenada hacia conclusiones universales. Ello le sirve para salir al paso de las críticas humanistas que objetaban el uso continuado del método filosófico en medicina.

La teoría de la herencia le sirve a Cardano para ponderar la experiencia personal en su juicio del galenismo. Para Galeno, la regla era que si predominaba el semen paterno, la descendencia se asemejaría al padre, pero si el semen femenino y la sangre menstrual eran más fuertes se asemejaría a la madre. Ahora bien, argüía Cardano, ¿cómo explicar las características de una persona con nariz del padre, ojos de la madre y el ingenio de la abuela? Porque en el alma y en el cuerpo hay muchas formas, cada una transmitida por uno de los progenitores, distintas en su ubicación y naturaleza.

La anatomía resultaba atrayente por muchas razones. Concernía a diversas disciplinas tradicionales (filosofía natural, medicina y cirugía) y constituía desde hacía largo tiempo una materia bien establecida en el curriculum académico. Al propio tiempo, junto con la botánica y la historia natural, se contaba entre las ciencias más sensibles a la expansión general del interés coleccionista. En cuanto ciencia descriptiva combinaba la observación, la manipulación, la descripción verbal y la representación visual de la naturaleza con el respeto reverencial por los textos antiguos. Comparada con su predecesora medieval, la anatomía del siglo XVI se distinguía por sus disecciones más frecuentes, técnicas mejoradas, mayor énfasis en la observación personal, mayor atención al detalle y una ilustración más realista.

La medicina, como la astrología, era una ciencia de la interpretación de los signos. Cardano estaba convencido de que la autopsia podía producir indicios claros para la certera confirmación de la diagnosis y prognosis precedentes. Pero fue mucho menos radical que Paracelso, cuyo repudio por la tradición académica y su pretensión de establecer una medicina alquímica, transformada, caló en la segunda mitad del XVI y el XVII. A diferencia de Paracelso, Cardano persistía integrado en la filosofía natural aristotélica y la medicina galénica. Sin embargo, lo mismo que Paracelso, fundó su autoridad en constantes apelaciones a su éxito en el ejercicio de la medicina y sus dotes especiales, fue sumamente crítico con la enseñanza oficial y se comprometió profundamente con las ciencias ocultas.

Theophrastus Bombast von Hohenheim, "Paracelso", había nacido cerca de Einsiedeln en 1493. No encontró en la universidad la ciencia soñada y buscó en el trato directo con otros maestros los conocimientos que la academia no podía ofrecerle. Viajó por Europa entera, cambiando acto médico

por sustento. Escritor prolífico, sus ideas sobre química y quimioterapia sobrevivieron a través de Van Helmont y los iatroquímicos.

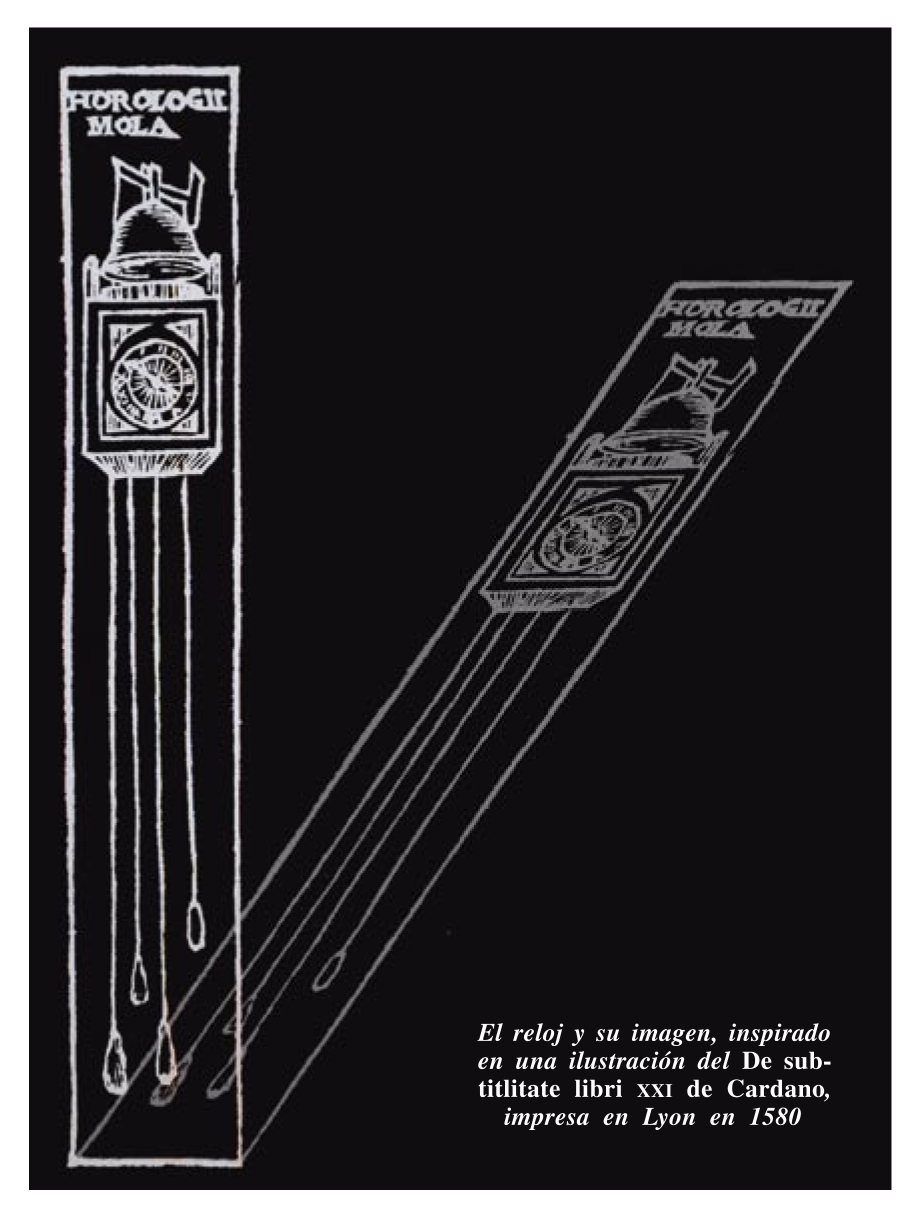
Dos libros recientes y un tercero recuperado se esfuerzan por hacernos más inteligible el universo paracelsista. Una visión interpretativa de las raíces de su pensamiento en *Paracelsus: Speculative Theory and the Crisis of the Early Reformation*; una investigación filológica en *De nomine et vocabulo: Der Begriff der medizinischen Fachsprache und die Krankheitsnamen bei Paracelsus* (1493-1541) y, por fin, la traducción al inglés, de su autodefensa y otros escritos más o menos autobiográficos en *Paracelsus. Four Treatises*. Empecemos por el último, dirigido por Henry E. Sigerist, suizo transterrado que profesionalizó la enseñanza de la historia de la medicina en América del Norte.

No es fácil acceder a Paracelso. Lo impide la barrera del lenguaje, el alemán hablado en Suiza en el siglo XVI. Las traducciones, obligadas, son auténticos ejercicios de interpretación. Del manojo de Sigerist, el primer tratado es traducción, realizada por C. Lilian Temkin, de sus *Sieben Defensiones, Verantwortung über etliche Verunglimpfungen seiner Missgönner*, una apasionada apología en siete actos de su carácter, actividades y filosofía. A sus 45 años Paracelso se siente prematuramente viejo, aunque con fuerza suficiente para darle réplica a sus implacables antagonistas, los médicos de escuela, "legión de sofistas". Se considera del linaje de Apolo, Podalirius e Hipócrates que operaron maravillas a la luz de la naturaleza, que no es otra que la que nos revela el secreto escondido del mundo. No hay buen médico, resume, si no se es buen químico.

Sigue a continuación la versión acometida por George Rosen de su trilogía sobre las enfermedades de los mineros (*Von der Bergsucht und anderen Bergkrankheiten drei Bücher*), la primera monografía de la historia de las enfermedades laborales. Paracelso tuvo conocimiento directo de las penalidades de la mina y sus observaciones revisten particular interés. Cada libro consta de cuatro tratados. En el libro primero analiza la etiología, patogénesis, sintomatología y terapia de la enfermedad pulmonar; en el segundo se detiene en los males que aquejan a quienes trabajan en fraguas y fundiciones; en el postrero estudia los envenenamientos por mercurio.

Con la traducción de *Von den Kranheiten, so die Vernunft berauben*, Gregory Zilboorg nos facilita la comprensión de la psicología y psiquiatría de Paracelso. Sigerist se encargó de la traducción del cuarto tratado que, no obstante redactarse en alemán, lleva título latino. El *Liber de nymphis, sylphis, pygmaeis et salamandris et de caeteris spiritibus* es un opúsculo sin pretensiones, si bien preñado de opiniones filosóficas y teológicas, donde nos confiesa su absoluta independencia ante cualquier confesión y escuela.

Las expresiones médicas y los nombres de los enfermedades, objeto *De nomine et vocabulo*, ha venido siendo tema recurrente, por la dificultad del reto, en los investigadores. Michael Kuhn, en este trabajo de grado, se sitúa en una perspectiva lingüística para buscar la respuesta de tres cuestiones cruciales. Tras la primera en torno a las diferencias entre paracelsismo y galenismo sobre qué considerar expresión médica, resuelve la teoría de la denominación en Paracelso y desentraña, por fin, la relación entre el concepto de expresión médica y la elocución médica real. Al definir los nombres de las enfermedades, lo mismo en su nivel teórico que en su dimensión práctica, se nos está revelando la estructura gramatical y semántica de la patología paracelsista. Para llevar a término ese trabajo de filigrana lingüística ha escogido textos de distintas etapas de su vida, desde manuscritos iniciales (*Elf Traktat von Ursprung, Ursachen, Zeichen und Kur einzelner Krankheiten*) hasta los escritos tardíos de Carinthia, pasando por las páginas dedicadas a los tres principios fundamentales de la naturaleza, o las más circunscritas sobre el mal francés.



El reloj y su imagen, inspirado en una ilustración del* De subtitlitate libri XXI de Cardano, *impresa en Lyon en 1580



“Enfermedad y constelaciones celestes”. Grabado de Hans Holbein el Joven

A Paracelso la pasión por el lenguaje se le despierta muy pronto. Da a veces la impresión de que se pierde en verbalismos. A propósito del término “anatomía”, por ejemplo, dice que debe identificarse con la operación interna; y aclara que cada hombre, cada enfermedad, cada planta, cada animal tiene su anatomía peculiar. El significado definitivo de anatomía será algo así como la resultante de la comparación entre anatomías.

Imposible desligar especulación metafísica y praxis, tal es, en resumen, el contenido del *Paracelsus* de Andrew Weeks. Quiere éste acercar su biografiado a la figura de Lutero. Ambos apuntalan el nacimiento de la lengua alemana. Pero el suizo insta, además, una reforma radical de la filosofía de la naturaleza, base de la medicina, donde quedan diluidos los bordes entre disciplinas. No hay fronteras entre la especulación médica, el razonamiento filosófico y la exégesis bíblica. Con ese criterio hermenéutico de conciliación se busca disolver la dicotomía en que se ha polarizado la historiografía paracelsista. Se ha venido cultivando un enfoque histórico-científico, representado por Karl Sudhoff, Walter Pagel y Allen G. Debus, y un enfoque teológico, seguido por Wilhelm Matthiessen, Franz Strunz y Kurt Goldammer.

Para Weeks los escritos seminales de Paracelso coinciden con los primeros frutos de la Reforma, en los años veinte. No era él ni luterano ni católico observante. La verdad es que todo en él está a medio camino. Juega con el nombre, *Para*celso, y señala que el prefijo se repite en varios de sus escritos: *Opus Paramirum de Medica Industria, Opus Paragranum*.

Rechaza el escolasticismo y aboga por sumergirse en la naturaleza, en la experiencia vivida de ésta. Sustituye el galenismo que, en su forma general, atribuía las enfermedades a desequilibrios humorales, por la nueva experiencia de la naturaleza transformada por la alquimia. Su experiencia alquímica no era, sin embargo, la de su contemporáneo Georg Agricola, sino un mixto de contemplación religiosa y expresión de los sentidos. Téngase en cuenta que la estructura triádica del ser humano y de las cosas del mundo —quintaesencia de su filosofía natural— era un reflejo de la Trinidad. Por esa vía se conoce el agente real de la enfermedad y, en particular, los verdaderos signos o signaturas de las cosas que revelaban los poderes recibidos de Dios para sanar.

LUIS ALONSO

Medicina

Teoría y praxis

THE PROGRESS OF EXPERIMENT. SCIENCE AND THERAPEUTIC REFORM IN THE UNITED STATES, 1900-1990. Harry M. Marks. Cambridge University Press, 1997.

Este libro aborda un asunto que, si bien se plantea como exclusivamente norteamericano, tiene una indudable actualidad internacional: el problema de la ciencia en la medicina. De manera empírica, en el contexto académico y profesional de los Estados Unidos de América durante el siglo XX, el autor, profesor de historia de la medicina en la Universidad Johns Hopkins y con amplio currículo formativo en historia y sociología de la ciencia, examina las complejas relaciones que existen entre las vertientes investigadora y práctica del ejercicio médico al hilo del acto terapéutico.

Concretamente, lo que el autor se plantea es examinar cuál es el modelo de “tratamiento científico” a lo largo del tiempo, modelo que surge de una elite (la que el denomina “reformadores terapéuticos”) y se quiere hacer extensivo al conjunto de la profesión médica. Para ello examina una serie de casos concretos, desde la actividad del Comité de Farmacia y Química creado por la *American Medical Association* en 1905 a una serie de importantes experiencias terapéuticas masivas realizadas en los Estados Unidos a lo largo del siglo; entre ellas, el proyecto coordinado de estudio de los arsenicales en el tratamiento de la sífilis (1928-1939), las pruebas con la penicilina (1941-45) y otros antibióticos o el proyecto universitario de estudio en grupo sobre antidiabéticos orales (1959-1975), entre otros. Estos estudios de casos, con amplia base archivística y bibliográfica, nos relacionan de forma inmediata no sólo con los problemas del establecimiento de la autoridad científica —en el seno de una definición del modelo que cambia con el tiempo— sino también con aspectos éticos y su no menos móvil contenido normativo a lo largo del tiempo.

El relato se dispone cronológicamente en ocho capítulos, una introducción general, una nota sobre fuentes y un detallado índice analítico, con la bibliografía en notas a pie de página. Su estilo es descriptivo y repetitivo, abre cada capítulo con una presenta-

ción y engarza cada apartado con su explícita hilazón con el precedente. El último capítulo realiza una nueva síntesis, a la vez que explora el aspecto más contemporáneo del problema, al contemplar la introducción del activismo de los consumidores, por ejemplo al hilo del peso alcanzado por las recomendaciones de los comités ciudadanos antisida en el diseño del empleo experimental de nuevos fármacos.

El estudio, pese a su contextualización local, resulta pertinente para el conjunto de las sociedades industriales, donde el modelo médico hegemónico es similar, puesto que las fuentes de autoridad que reclama la ciencia (y su conflicto con las diferentes culturas profesionales y populares) en cada caso son las mismas. Las cuestiones que suscita resultan de enorme actualidad, y pueden ponerse fácilmente en relación con los problemas que levanta la actual ofensiva "genetista". Absolutamente recomendable.

ESTEBAN RODRÍGUEZ OCAÑA



Aparición de una supernova (flecha) *tras detectarse un incremento de radiación gamma*

Agujeros negros

y estrellas relativistas

BLACK HOLES AND RELATIVISTIC STARS. Dirigido por Robert M. Wald. The University of Chicago Press; Chicago, 1998.

Bajo este título se recogen una docena de conferencias pronunciadas en la Universidad de Chicago, hace dos años, para honrar la memoria de Subrahmanyan Chandrasekhar, pionero e impulsor de ese campo de la astrofísica. La obra se estructura en dos grandes grupos de análoga extensión. El primero se ocupa de agujeros negros y estrellas relativistas como objetos astrofísicos y como objetos cuya estructura y propiedades pueden analizarse con la ayuda de la relatividad general clásica. El segundo considera los agujeros negros bajo el prisma de la gravedad cuántica.

La primera parte comienza con sendos artículos de Valeria Ferrari y John Friedman sobre estrellas relativistas. Ferrari trata las oscilaciones no radiales de las estrellas; Friedman pasa revista a los recientes avances en estabilidad de estrellas relativistas que giran a alta frecuencia.

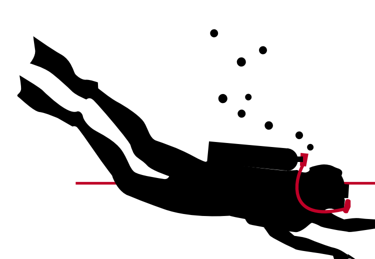
El artículo de Kip Thorne sintetiza las esperanzas puestas en los interferómetros VIRGO y LIGO en el estudio de la física de agujeros negros y estrellas de neutrones a través del análisis de la radiación gravitatoria proveniente de la evolución de dichos objetos. La puesta en órbita del interferómetro espacial LISA permitirá la resolución de la radiación de muy baja frecuencia.

Martin Rees resume las pruebas observacionales en favor de la existencia de agujeros negros. En el caso de agujeros negros en sistemas astrofísicos binarios emisores de rayos X, ésta no ha hecho más que aumentar. De mayor relevancia si cabe es la presencia de agujeros negros supermasivos en el núcleo de las galaxias vecinas, incluida la nuestra. Sin duda una de las cuestiones clave en relatividad general clásica es si la "hipótesis de censura cósmica" es válida: ¿El colapso gravitacional completo de un objeto (por ejemplo una estrella de gran masa) conduce siempre a un agujero negro, o podría en ocasiones producirse una "singularidad desnuda"? Por "singularidad desnuda" se entiende la que no está oculta por un horizonte de sucesos a los ojos del observador. Roger Penrose nos ofrece las distintas versiones de dicha hipótesis, al tiempo que examina el progreso reciente encaminado hacia su demostración y también hacia su refutación.

Saul Teukolsky nos describe los avances en relatividad numérica orientada al estudio de las colisiones entre agujeros negros. Esta ha permitido comprender, al menos parcialmente, la estructura del horizonte de sucesos en la formación de agujeros negros y en la colisión de éstos. Se ha argumentado desde hace tiempo que el "horizonte interno" tanto de los agujeros negros rotatorios como de los agujeros negros con carga eléctrica es inestable ante pequeñas perturbaciones, de ahí que en principio habrían de ser singulares. Werner Israel nos introduce en las características de la singularidad.

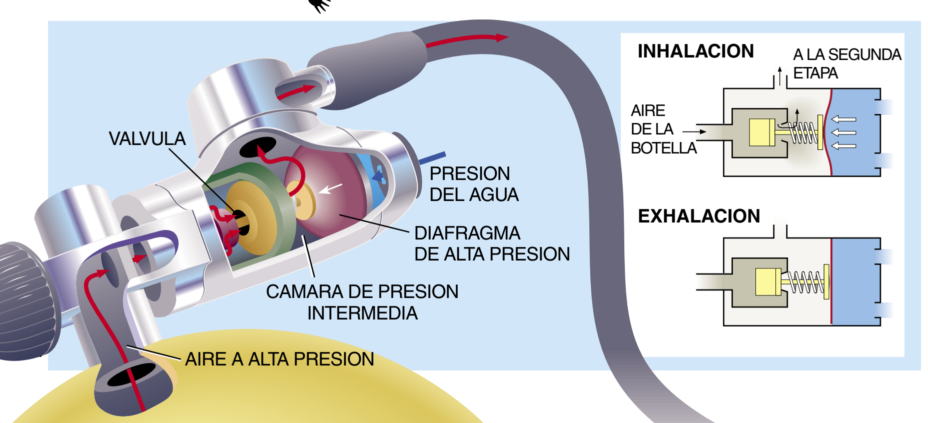
El segundo grupo comienza con sendos artículos de Robert Wald y Rafael Sorkin sobre termodinámica de agujeros negros. El primero deduce las leyes de la termodinámica de estos objetos y muestra su paralelismo con la termodinámica habitual, es decir, la relativa a cuerpos dominados por la interacción electromagnética. El segundo artículo se centra en el origen microscópico de la entropía de los agujeros negros y analiza la validez de la segunda ley generalizada de la termodinámica de dichos objetos. Esta afirma que la entropía de un agujero negro más la de su entorno no puede decrecer. Los dos artículos siguientes discuten la posible pérdida de información en los procesos de formación y evaporación de un agujero negro. Según James Hartle los principios de la mecánica cuántica no se violan cuando los estados cuánticos puros evolucionan, en esos procesos, a estados mezcla. Stephen Hawking pasa revista a los argumentos en favor de la pérdida de información y nos describe cómo ésta puede darse también en la formación y evaporación de pares de agujeros negros virtuales. El artículo de Gary Horowitz sobre agujeros negros en la teoría de cuerdas fundamentales cierra esta segunda colección. El libro concluye con dos semblanzas de Chandrasekhar. La primera por Wali (su biógrafo), la segunda por Lalitha Chandrasekhar (su viuda). En ambas destaca el aspecto humano del premio Nobel.

DIEGO PAVÓN

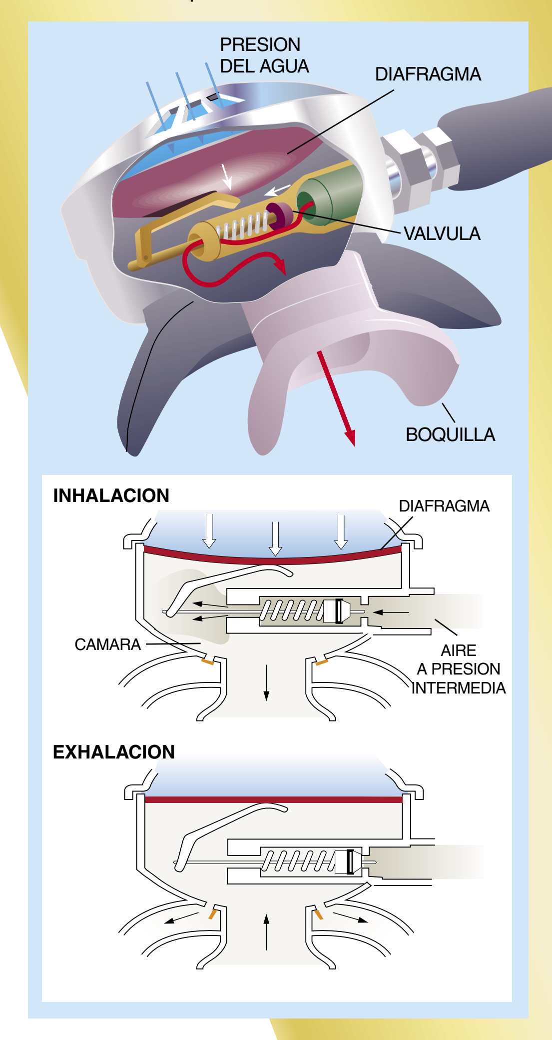


IDEAS APLICADAS

William A. Bowden



1. EN UNA PRIMERA ETAPA, el regulador mantiene una presión intermedia de 6 a 10 atmósferas en el tubo flexible, que nos conduce a la segunda etapa. Hay varios diseños, de los que acaso el de más éxito sea el de diafragma. Siempre que el buceador aspira, la presión baja en el tubo flexible y en la cámara de presión intermedia, haciendo que el diafragma flexe hacia adentro. Esa flexión abre una válvula que deja pasar aire a alta presión desde la botella hasta la cámara y tubo flexible. La presión circundante (ambiente) del agua contra el diafragma contribuye a que la presión intermedia en la cámara y el tubo se mantenga dentro de cierto valor por encima de la presión ambiente.



2. EN UNA SEGUNDA ETAPA, el regulador reduce la presión intermedia en el tubo hasta la presión ambiente, cualquiera que sea la profundidad, facilitando una respiración cómoda. Como la primera etapa, se basa en un diafragma. Al entrar el aire por la boquilla, el diafragma flexa hacia adentro y empuja una palanca que abre una válvula. Esta deja entrar aire a presión intermedia procedente del tubo flexible. La presión del agua contra la cara externa del diafragma iguala la presión del aire en la cámara a la presión del agua circundante.

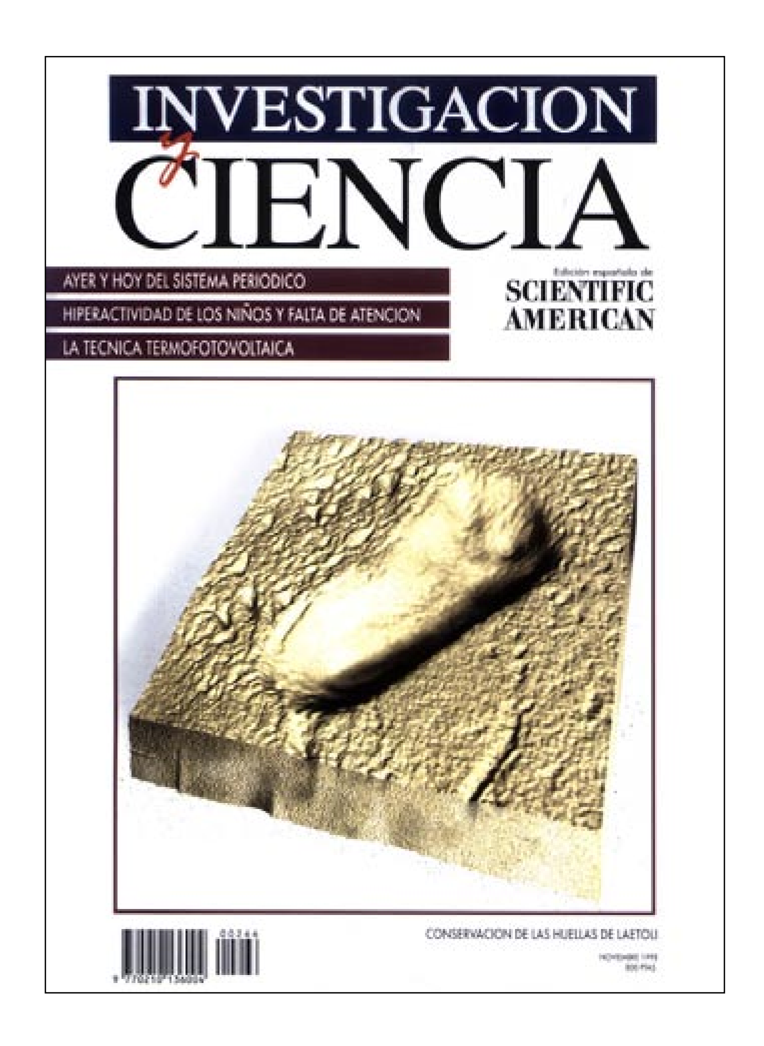
Reguladores de inmersión

El regulador de consumo, que conecta una botella de aire a gran presión para buceo a una boquilla de respiración, abrió el mundo submarino a centenares de millones de personas. Sin encerrar especial complejidad, ese mecanismo nos permite contemplar lo que la gente sólo pudo imaginar o fantasear durante miles de años. Con ello se transformó la imagen del reino de Neptuno; considerado un lugar misterioso de connotaciones sombrías y ominosas, se nos hizo familiar y preñado de maravillas.

Gracias al regulador, el buceador respira cómodamente bajo el agua controlando el gas respiratorio contenido a alta presión en la botella, igualando la presión de ese gas a la presión ambiente existente en la profundidad a la que se halle el buceador, cualquiera que sea esa profundidad. El proceso de regulación consta de dos etapas. En la primera se reduce la presión de la botella, normalmente más de 200 atmósferas con la botella llena, hasta una presión intermedia comprendida entre 6 y 10 atmósferas. Luego, en la segunda etapa, esa presión intermedia se reduce a la presión ambiente (en agua marina, unas 3 atmósferas a 20 metros, o unas 4 atmósferas a 30 metros).

Los reguladores empezaron a comercializarse en 1953, cuando Dacor presentó el C1 y U.S. Divers salió con su modelo Aqua-Lung. Hacia la mitad de los años sesenta los reguladores experimentaron modificaciones importantes, al sustituirse los modelos de tubo flexible doble por los de tubo flexible único; en estos segundos, el gas exhalado se descargaba junto a la boquilla. A finales de los años setenta se produjeron también otros refinamientos de interés, cuando el caucho natural y las piezas de latón cedieron el paso a materiales sintéticos más duraderos e impermeables (como siliconas y poliuretano) y al acero inoxidable. Además, hubo también mejoras ergonómicas en boquillas y colectores de descarga.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA SINTESIS DE ELEMENTOS SUPERPESADOS, por Peter Armbruster

Ciertos efectos que se producen en la estructura estratificada de los núcleos atómicos, junto con una técnica experimental de primera línea, han posibilitado producir los seis elementos más pesados obtenidos hasta la fecha, de números atómicos 107 al 112.

LA INGRAVIDEZ Y EL CUERPO HUMANO, por Ronald J. White

Los efectos que los viajes espaciales ejercen en el organismo pueden asociarse a determinados achaques de la vejez. La investigación del estado de salud de los astronautas favorece una mejor atención médica en órbita y en tierra firme.

EINSTEIN, HILBERT Y LA TEORIA GENERAL DE LA RELATIVIDAD, por Leo Corry

La formulación casi simultánea por Hilbert y Einstein de las ecuaciones de campo, corazón de la teoría general de la relatividad, dio pie a una interpretación errónea de la prioridad, resuelta por el autor.

EL DESORDEN DE HIPERACTIVIDAD Y DEFICIT DE ATENCION, por Russell A. Barkley

El desorden de hiperactividad y déficit de atención se debe a un fallo en el autocontrol. Este trastorno, de origen génico, podría darse en virtud de un desarrollo inapropiado de determinados circuitos cerebrales.

CONSERVACION DE LAS HUELLAS DE LAETOLI, por Neville Agnew y Martha Demas

El descubrimiento de huellas de homínidos en el este de Africa replanteó el estudio de los orígenes humanos. Los conservadores han protegido de las destrucción las pistas, muy frágiles.

LA EVOLUCION DEL SISTEMA PERIODICO, por Eric R. Scerri

Desde sus orígenes, hace unos 200 años, la tabla periódica se ha convertido en una herramienta indispensable para la química moderna.

LA NUBE DE OORT, por Paul R. Weissman

En las afueras del sistema solar vaga una vasta nube de cometas, bajo la influencia del Sol y de otras estrellas. La dinámica de esta nube podría explicar la extinción en masa de organismos terrestres.

LA TECNICA TERMOFOTOVOLTAICA, por Timothy J. Coutts y Mark C. Fitzgerald

La conversión en electricidad del calor radiado puede demostrar su aptitud para alumbrar poblaciones remotas o propulsar automóviles.

